

Trabajo de Fin de Grado

**Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales**

# **Caracterización del powertrain de un vehículo modular eléctrico: categoría M1**

**MEMORIA**

|                      |                         |
|----------------------|-------------------------|
| <b>Autor:</b>        | López Álvarez, Edgar    |
| <b>Director:</b>     | Hernández Chiva, Emilio |
| <b>Convocatoria:</b> | Junio 2017              |



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



## Resumen

En este documento se detalla el proceso de estudio de las características necesarias que debe tener el tren de potencia de un vehículo eléctrico y de la selección de los componentes que lo forman, en base a una serie de parámetros técnicos calculados a lo largo del trabajo.

El objetivo último del proyecto consiste en definir el *powertrain* de un vehículo eléctrico urbano que suponga una alternativa a sus homólogos de combustión y cuyas prestaciones respondan a unas necesidades muy concretas. La circulación del vehículo al que va destinado este *powertrain* está enfocada a los centros urbanos y vías específicas, de manera que no se trata de un vehículo de transporte convencional. Éste pretende dar solución a una problemática de circulación, contaminación y superpoblación de vehículos privados en los centros de las grandes ciudades.

Para la caracterización del tren de potencia se lleva a cabo una metodología de cálculo propia con cada componente. En relación al motor eléctrico, se realiza un cálculo de las fuerzas resistentes al avance (aerodinámica, rodadura y pendiente) para determinar qué potencia necesita suministrar al vehículo. En el caso del sistema de baterías, se plantea un análisis energético relativamente simple del que se puede extraer la capacidad de carga necesaria que deben tener. Una vez hechos los cálculos, queda determinado como deben ser otros elementos del tren de potencia, como el controlador del motor, el sistema de control de baterías o el cargador interno del vehículo.

A lo largo de todo el proyecto y del proceso de caracterización de componentes, se suponen una serie de valores, unos obtenidos a partir de sencillos cálculos teóricos y otros a partir de las prestaciones de modelos de vehículos eléctricos similares existentes en el mercado. Estos valores intermedios resultan necesarios para poder avanzar en la caracterización y así poder definir como deben ser los componentes finales.

Finalmente, se realiza un estudio de diferentes fabricantes y marcas distribuidoras para seleccionar los modelos de los componentes, que deben adecuarse lo máximo posible a las prestaciones calculadas y a la vez formar un conjunto económicamente competitivo con respecto a las alternativas existentes. Los vehículos modulares en los que se implementarán estos trenes de potencia pretenden suponer una mejora en la deficiente movilidad de transporte en los centros de las grandes urbes.



## Sumario

|   |           |
|---|-----------|
| <b>RESUMEN</b>  | <b>2</b>  |
| <b>SUMARIO</b>  | <b>4</b>  |
| <b>1. ÍNDICE DE FIGURAS</b>                             | <b>6</b>  |
| <b>2. ÍNDICE DE TABLAS</b>                              | <b>7</b>  |
| <b>3. GLOSARIO</b>                                      | <b>8</b>  |
| <b>4. INTRODUCCIÓN</b>                                  | <b>9</b>  |
| <b>5. CONFLICTO A RESOLVER</b>                          | <b>10</b> |
| <b>6. ALCANCE Y ESTRUCTURA DEL PROYECTO</b>             | <b>14</b> |
| <b>7. COMPONENTES BÁSICOS DEL POWERTRAIN ELÉCTRICO</b>  | <b>16</b> |
| <b>7.1. MOTOR ELÉCTRICO</b>                             | <b>17</b> |
| 7.1.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO                      | 17        |
| 7.1.2. TIPOS DE MOTORES ELÉCTRICOS ACTUALES             | 18        |
| <b>7.2. CONJUNTO DE BATERÍAS</b>                        | <b>21</b> |
| 7.2.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO                      | 21        |
| 7.2.2. TIPOS DE BATERÍAS PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO        | 23        |
| 7.2.3. SUPERCONDENSADORES Y SISTEMAS DE CARGA HÍBRIDOS  | 26        |
| <b>7.3. BLOQUE ELECTRÓNICO DE POTENCIA</b>              | <b>29</b> |
| 7.3.1. CONTROLADOR DEL MOTOR                            | 29        |
| 7.3.2. CARGADOR INTERNO DEL VÉ                          | 32        |
| 7.3.3. SISTEMA DE GESTIÓN DE LA BATERÍA (BMS)           | 33        |
| <b>8. ALTERNATIVAS EN EL MERCADO</b>                    | <b>35</b> |
| <b>9. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN</b>       | <b>38</b> |
| <b>10. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PREVISTAS</b>          | <b>40</b> |
| 10.1. MASA TOTAL DEL VEHÍCULO EN CARGA                  | 40        |
| 10.2. VELOCIDAD MÁXIMA ALCANZADA                        | 40        |
| 10.3. SUPERFICIE FRONTAL DEL CHASIS                     | 41        |
| 10.4. COEFICIENTE DE PENETRACIÓN AERODINÁMICO           | 41        |
| 10.5. AUTONOMÍA   | 42        |
| 10.6. CONSUMO ENERGÉTICO DE LAS BATERÍAS                | 42        |
| <b>11. CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL MOTOR</b>             | <b>43</b> |
| 11.1. RESISTENCIA A LA RODADURA                         | 44        |
| 11.2. RESISTENCIA AERODINÁMICA                          | 45        |
| 11.3. RESISTENCIA AL AVANCE EN PENDIENTE (GRAVITATORIA) | 46        |
| 11.4. POTENCIA MÁXIMA NECESARIA                         | 47        |
| 11.5. PARTICULARIZACIÓN Y CÁLCULOS                      | 47        |
| <b>12. CÁLCULO DE BATERÍAS</b>                          | <b>49</b> |



|   |           |
|---|-----------|
| <b>12.1. PARÁMETROS ENERGÉTICOS</b>                               | <b>49</b> |
| <b>12.2. PARTICULARIZACIÓN Y CÁLCULOS</b>                         | <b>50</b> |
| <b>13. SELECCIÓN DE COMPONENTES: SOLUCIÓN FINAL</b>               | <b>52</b> |
| <b>13.1. MOTOR ELÉCTRICO SELECCIONADO</b>                         | <b>52</b> |
| <b>13.2. CONTROLADOR DEL MOTOR SELECCIONADO</b>                   | <b>53</b> |
| <b>13.3. SISTEMA DE BATERÍAS SELECCIONADO</b>                     | <b>54</b> |
| <b>13.4. BMS SELECCIONADO</b>                                     | <b>56</b> |
| <b>13.5. CARGADOR INTERIOR SELECCIONADO</b>                       | <b>59</b> |
| <b>14. ESTUDIO DE COSTES</b>                                      | <b>61</b> |
| <b>14.1. PRECIOS DE LOS COMPONENTES</b>                           | <b>61</b> |
| <b>14.2. REMUNERACIÓN DEL PROYECTO</b>                            | <b>63</b> |
| <b>15. PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO Y PROGRAMACIÓN</b>              | <b>65</b> |
| <b>16. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL</b>                                 | <b>67</b> |
| <b>16.1. FACTORES DETERMINANTES EN LA HUELLA AMBIENTAL DEL VE</b> | <b>67</b> |
| <b>16.2. RECICLAJE DE BATERÍAS</b>                                | <b>68</b> |
| <b>17. NORMATIVA APLICABLE</b>                                    | <b>69</b> |
| <b>CONCLUSIONES</b>   | <b>71</b> |
| <b>ANEXOS</b>   | <b>72</b> |
| <b>ANEXO I. ALTERNATIVAS ESTUDIADAS</b>                           | <b>72</b> |
| <b>ANEXOS II. COMPONENTES SELECCIONADOS</b>                       | <b>76</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA</b>   | <b>80</b> |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                                 | <b>80</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA</b>                                | <b>81</b> |

## 1. Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 7.1-</b> Esquema de los elementos básicos del powertrain de un VE*   | 16 |
| <b>Figura 7.2-</b> Componentes de un brushed DC Motor  | 17 |
| <b>Figura 7.3-</b> Fenómeno de inducción en el rotor de un motor asíncrono   | 19 |
| <b>Figura 7.4-</b> Proceso de carga y descarga de una batería de iones de Litio  | 22 |
| <b>Figura 7.5-</b> Celda individual de un EDLC y esquema eléctrico equivalente   | 27 |
| <b>Figura 7.6-</b> Esquema de funcionamiento básico del MCU  | 30 |
| <b>Figura 7.7-</b> Esquema eléctrico de un inversor trifásico con control PWM  | 31 |
| <b>Figura 7.8-</b> Circuito rectificador con puente de Graetz y forma de onda de salida  | 32 |
| <b>Figura 9.1-</b> Curva típica de par y potencia de un motor eléctrico  | 38 |
| <b>Figura 10.1-</b> Plano con cotas del furgón Piaggio Porter del fabricante   | 41 |
| <b>Figura 11.1-</b> Diagrama de fuerzas en la rueda del vehículo   | 44 |
| <b>Figura 11.2-</b> Representación de las fuerzas resistentes en pendiente   | 46 |
| <b>Figura 13.1-</b> Motor eléctrico modelo AC12-07.51 de HPEVS   | 52 |
| <b>Figura 13.2-</b> Controlador Curtis 1238-7601   | 53 |
| <b>Figura 13.3-</b> Celda prismática individual de 3,2 V (izquierda) y pack de 4 celdas de 12,8 V (derecha), ambos con capacidad de 100 Ah | 55 |
| <b>Figura 13.4-</b> Sistema final de baterías seleccionado de 96 V y 200 Ah  | 56 |
| <b>Figura 13.5-</b> Cadena de sensores BMS-EL-V7 (izquierda) y montaje sobre un pack de 12 V y 100 Ah (derecha)                            | 57 |
| <b>Figura 13.6-</b> Kit BMS-EP128 de AA Portable Power Corporation   | 57 |
| <b>Figura 13.7-</b> Cargador eléctrico modelo PFC1500-TCCH-9612  | 59 |
| <b>Figura 14.1-</b> Desglose de costes de los componentes  | 62 |
| <b>Figura 15.1-</b> Diagrama de Gantt del proyecto   | 66 |

## 2. Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 5.1-</b> Tasa de ocupación media del transporte en Barcelona .....                         | 10 |
| <b>Tabla 5.2-</b> Tiempo necesario para llegar al trabajo en transporte privado .....               | 11 |
| <b>Tabla 8.1-</b> Alternativas de mercado de vehículos eléctricos.....                              | 36 |
| <b>Tabla 13.1-</b> Características técnicas de una celda individual de la batería.....              | 55 |
| <b>Tabla 13.2-</b> Especificaciones técnicas del sistema de control de baterías modelo BMS-EP128... | 59 |
| <b>Tabla 13.3-</b> Especificaciones técnicas del cargador modelo PFC1500 .....                      | 60 |
| <b>Tabla 14.1-</b> Precios de los componentes y coste total del powertrain .....                    | 61 |
| <b>Tabla 14.2-</b> Desglose de actividades y remuneración .....                                     | 64 |

### 3. Glosario

| ABREVIATURA | SIGNIFICADO                                       |
|-------------|---|
| AC          | Alternating Current                               |
| BMS         | Battery Management System                         |
| CAN         | Controller Area Network                           |
| DC          | Direct Current                                    |
| DOD         | Depth of Discharge                                |
| ECU         | Electronic Control Unit                           |
| EDLC        | Electric Double-Layer Capacitor                   |
| EM          | Electric Motor                                    |
| HEV         | Hybrid Electric Vehicle                           |
| IGBT        | Insulated Gate Bipolar Transistor                 |
| LCD         | Liquid Cristal Display                            |
| LFP         | Lithium Iron Phosphate Battery                    |
| LMO         | Lithium Manganese Polymer Battery                 |
| MCU         | Motor Control Unit                                |
| MOSFET      | Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor |
| NMC         | Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide Battery     |
| NTSC        | National Television System Committee              |
| OMS         | Organización Mundial de la Salud                  |
| PP          | Polipropileno                                     |
| PVDF        | Polyvinylidene Difluoride                         |
| PWM         | Pulse-Width Modulation                            |
| REESS       | Rechargeable Energy Storage System                |
| SOC         | State of Charge                                   |
| VE          | Vehículo Eléctrico                                |

## 4. Introducción

La finalidad de este proyecto es la caracterización del **powertrain de un vehículo modular eléctrico de categoría M1**. El *powertrain*, o tren de potencia, es el sistema de propulsión que utiliza un vehículo para moverse. En el caso de un vehículo eléctrico, concretamente, este sistema está formado por varios componentes, entre los cuales se encuentran el motor eléctrico, el conjunto de baterías, el controlador del motor, el sistema de gestión de baterías y el cargador interno del vehículo, entre otros. Todos estos componentes definen el bloque eléctrico de potencia del vehículo.

Para conocer cuáles son las características necesarias que debe tener el *powertrain*, es necesario y primordial definir qué tipo de vehículo se pretende diseñar y para qué finalidad. Conociendo el vehículo solución, se pueden establecer los valores y las prestaciones que deben cumplir todos los componentes para garantizar un sistema adecuado y fiable.

El vehículo final para el que va destinado este tren de potencia es un coche eléctrico modular pensado para circular por centros urbanos y áreas especiales, y responde a una problemática muy concreta que se explica en profundidad en el **apartado 5**.

Estrictamente, el tipo de vehículo modular al cual va dirigido el diseño del tren de potencia se encuentra dentro de la categoría de homologación M1. Por tanto, deberá cumplir con una serie de requisitos indispensables que entran dentro de la normativa legal [1].

Los vehículos de categoría M son vehículos de motor concebidos y fabricados principalmente para el transporte de personas y su equipaje. El vehículo tiene por lo menos 4 ruedas o solo 3 cuando su peso exceda el de 1 tonelada.

Asimismo, dentro de la categoría M, los vehículos de categoría M1 son los vehículos que tengan, como máximo, ocho plazas de asiento además de la del conductor. Además no disponen de ningún espacio para viajeros de pie y el número de plazas podrá limitarse a una, es decir, la del conductor.

Por tanto, existen varias posibilidades relacionadas con el número de pasajeros que puede tener el vehículo dentro de la misma categoría. Atendiendo a la necesidad a la que pretende dar solución, se ha decidido considerar un vehículo de categoría M1 con 4+2 plazas (4 plazas para pasajeros, contando el conductor, y 2 plazas más para el maletero), de manera que tendrá una tipología de servicio parecida a la de un taxi convencional.

## 5. Conflicto a resolver

El vehículo eléctrico objeto de estudio de este trabajo pretende satisfacer unas necesidades muy específicas e intenta dar solución a un conflicto que conviene explicar y detallar en profundidad para entender la finalidad del proyecto.

Actualmente, la contaminación, los atascos y el ruido excesivo han formado parte del día a día del centro de las grandes ciudades, todo provocado por un exceso de vehículos de uso privado que sobrepasan la capacidad de las zonas metropolitanas, las carreteras y otras vías de circulación urbanas.

A pesar de que en los últimos tiempos se han intentado realizar políticas, impulsadas por los ayuntamientos, que pretenden devolver los centros urbanos a la gente, con la construcción de más zonas peatonales y zonas restringidas a los vehículos, esta situación, lejos de mejorar, empeora a medida que pasan los años.

En Barcelona, por ejemplo, las políticas de movilidad de la ciudad recogidas en el Plan de Movilidad Urbana 2013-2018 [2], promueven los desplazamientos seguros, sostenibles, equitativos y eficientes de manera prioritaria. La pacificación del tráfico, el incremento de áreas de peatones y la implantación de las supermanzanas, son estrategias para conseguir que la movilidad en la ciudad sea más tranquila y sana, sin perjuicio del uso del coche para los desplazamientos en los que sea necesario. Pese a todo esto, los datos del ayuntamiento de Barcelona recogidos en 2015 [3] muestran que la tasa de ocupación media del transporte privado de la gente residente en la ciudad es de 1,7 personas por coche en día laboral.

| La movilidad de los barceloneses por distritos. 2015 |                                    |
|--|------------------------------------|
| Tasa de ocupación media del transporte privado       |                                    |
| Distrito de residencia                               | Ocupación media declarada en coche |
| <b>BARCELONA</b>                                     | <b>1,7</b>                         |
| 1. Ciutat Vella                                      | 1,5                                |
| 2. Eixample  | 1,9                                |
| 3. Sants-Montjuïc                                    | 1,5                                |
| 4. Les Corts   | 1,6                                |
| 5. Sarrià-St Gervasi                                 | 1,7                                |
| 6. Gràcia  | 1,6                                |
| 7. Horta-Guinardó                                    | 1,7                                |
| 8. Nou Barris  | 1,8                                |
| 9. Sant Andreu                                       | 1,8                                |
| 10. Sant Martí                                       | 1,6                                |

**Tabla 5.1-** Tasa de ocupación media del transporte en Barcelona

Fuente: Ajuntament de Barcelona, Departament d'Estadística. Enquesta de Mobilitat en Dia Feiner 2015 (EMEF 2015). La Mobilitat a Barcelona.

Y en otras grandes urbes la situación es aún peor: en la Comunidad de Madrid se realizan diariamente 2.350.000 desplazamientos en coche, en los que van, de media, 1,1 personas, según datos del Plan de Movilidad Urbana Sostenible [4]. Es decir, casi un vehículo por ciudadano.

La Agencia Europea del Medio Ambiente [5] proporciona también datos preocupantes; la tasa de ocupación media por vehículo en los países de la unión europea se sitúa en 2016 en 1,3 pasajeros.

Estos datos indican que, además de existir una gran cantidad de coches que circulan en las ciudades, estos vehículos van prácticamente desocupados, de forma que no se da un uso adecuado a las plazas que ofrece cada vehículo.

¿Qué consecuencias negativas tiene esta superpoblación de coches “vacíos” en los ciudadanos de la urbe? Un estudio realizado por la consultora Nielsen en 2014 realizó una encuesta para saber cuanto tiempo tardaban los trabajadores de las distintas ciudades europeas en llegar al trabajo en coche [6].

|              | Alemania | España | Francia | Italia | Gran Bretaña | Unión Europea |
|--------------|----------|--------|---------|--------|--------------|---------------|
| > de 10'     | 27%      | 34%    | 38%     | 25%    | 39%          | 37%           |
| De 10' a 20' | 7%       | 9%     | 12%     | 9%     | 12%          | 9%            |
| De 21' a 30' | 1%       | 5%     | 5%      | 6%     | 5%           | 5%            |
| De 30' a 60' | 9%       | 11%    | 10%     | 10%    | 10%          | 11%           |
| < de 60'     | 56%      | 41%    | 35%     | 49%    | 35%          | 39%           |

**Tabla 5.2-** *Tiempo necesario para llegar al trabajo en transporte privado*

*Fuente: Informe Nielsen 'Inercias en los medios de transporte'*

El estudio reflejado en la **Tabla 5.2** muestra que en España el 41% de los trabajadores que van en transporte privado tardan más de 1 hora en llegar al trabajo, por encima de la media europea que se sitúa en un 39%. Se puede observar que el porcentaje de ciudadanos que tarda menos de 10 minutos es también elevado, pero hay que tener en cuenta que el 91% de los encuestados que tardan tan poco tiempo se desplaza en motocicleta, lo que supone un ahorro considerable de tiempo.

Por tanto, el problema de tardar tanto tiempo en llegar al trabajo no reside en el hecho de vivir lejos de éste, sino de viajar en coche.

Otro factor clave que hay que tener en cuenta es el económico. Obviamente el precio de los combustibles fósiles que alimentan los coches convencionales es elevado y representa el gasto principal que debe asumir el usuario para desplazarse. Si a esto se le añade el hecho de realizar estos viajes diariamente, de ida y vuelta, durante tantas horas y con el vehículo prácticamente parado, el consumo de combustible de un coche de gasolina o diesel aumenta de forma crítica. Lógicamente esto se traduce en un sobre coste en combustible que tiene que afrontar el conductor y que no existiría si la circulación en los centros urbanos fuese fluida.

Este sobre coste económico se agrava en muchas ciudades europeas, donde además se penaliza el uso de coches de gasolina. De nuevo con el ejemplo de Barcelona, donde la Generalitat aprobó en 2016 un primer proyecto de ley [7], orientado a combatir el cambio climático y que incluye una figura tributaria sobre emisión de gases contaminantes de turismos y furgonetas. La normativa incluye una nueva figura impositiva: un impuesto sobre emisiones de CO<sub>2</sub> en turismos y furgonetas que se aplicará de forma gradual a partir de 2018, año en el que se empezará a aplicar en los vehículos más contaminantes (más de 160 gramos de CO<sub>2</sub> por Km). Para un turismo medio que emita entre 120 y 130 gramos, se pagarán unos 5,5 euros, mientras que en los casos de vehículos más contaminantes (por encima de 235 gramos) serán 84 euros al año. Se prevé que el coste estos impuestos vaya en aumento en los años siguientes.

De esta forma se llega al último punto negativo: el impacto ambiental. Según datos de la OMS, más de 400.000 personas mueren prematuramente cada año en la UE por la mala calidad del aire, y esta contaminación se debe en un 65% al transporte por carretera. España no se salva de la contaminación, donde ésta aumenta progresivamente a medida que pasan los años, con una concentración en el aire de partículas en suspensión actualmente mayor que la que había 10 años atrás .

Para intentar mejorar esta situación, el Ayuntamiento de Barcelona ha puesto fecha de caducidad a los vehículos más contaminantes de la ciudad. En 2020 se prohibirá la circulación de determinados coches de manera permanente. Las medidas anunciadas [8] van dirigidas a reducir los niveles de dióxidos de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y partículas en suspensión (PM10), que aumentaron un 11 y un 13% según el informe de salud presentado a principios de noviembre de 2016 . El incremento de estos elementos está relacionado con el aumento de la movilidad de vehículos privados en Barcelona durante los últimos meses de 2016.

En forma de resumen, la problemática que se presenta en este proyecto se puede desglosar en los siguientes factores:

- Superpoblación de vehículos en centros urbanos.
- Retenciones de tráfico en las carreteras con sus consecuentes pérdidas de tiempo.
- Sobre coste económico del transporte privado de gasolina.



- Aumento constante de la contaminación.
- Posible incapacidad para circular con transporte privado en la ciudad, si éste es contaminante.

El uso del vehículo eléctrico pretende dar solución a parte de la problemática, disminuyendo notablemente los costes de combustible y eliminando la contaminación. En el mercado actual existe multitud de marcas que fabrican coches eléctricos de uso privado, desde coches de gama media como pueden ser los de la marca Nissan, Renault o Smart, hasta gamas superiores como Tesla. Este tipo de vehículos están destinados a circular de la misma manera que lo hacen sus homólogos de gasolina, y su diseño estructural y funcional es el mismo.

El problema surge cuando se quiere dar solución a la congestión en las ciudades y liberar los centros urbanos; cuando se buscan vehículos de transporte en ciertos ámbitos donde la industria de la automoción no puede dar una solución adaptada para estos casos.

El tipo de vehículo que se quiere tener en cuenta para este proyecto es el siguiente: un coche eléctrico que, respetando el medio ambiente, esté diseñado para responder a unas especificaciones muy concretas y pueda circular por donde los coches tradicionales no pueden funcionar. Estas zonas pueden ser:

- Zonas reservadas: polígonos industriales restringidos, hospitales, lugares deportivos, aeropuertos, puertos marítimos, estaciones de ferrocarril, ferias, campus universitarios, ciudades y parques naturales y culturales y de ocio, parques zoológicos, etc.
- Centros urbanos: urbanizaciones; zonas peatonales con servicios de transporte adecuados; zonas de administración municipal; taxis; servicios públicos: de limpieza, jardines, correos, obras; servicios de salud como ambulancias; entregas: comida, flores, periódicos, libros, medicamentos; servicios privados: electricistas, fontaneros, vidrieros; etc.

## 6. Alcance y estructura del proyecto

El alcance del proyecto incluye el estudio y explicación de los componentes necesarios para implementar el *powertrain*, el análisis de las alternativas de vehículos eléctricos similares existentes en el mercado actual, el cálculo de las características técnicas y prestaciones que necesita tener cada uno de los elementos del tren de potencia, la elección de los productos y modelos que se consideren más adecuados para ser implementados, el cálculo del precio total de todos los componentes y del proyecto, una planificación para la realización de las etapas que lo componen, y el cálculo aproximado del impacto ambiental que supone el sistema solución final.

Primero se expondrán cuales son los elementos básicos y más importantes que componen el *powertrain* de un vehículo eléctrico, explicando su función dentro del sistema y resumiendo cual es el principio de funcionamiento que cumple cada uno.

Después se seleccionarán algunos modelos de coches eléctricos, con características similares al que se pretende estudiar, para observar que alternativas existen actualmente en el mercado, y así poder tomar algunas de sus especificaciones técnicas y prestaciones como referencia para posteriores cálculos.

Se analizarán las distintas estructuras que puede presentar el sistema de propulsión de un vehículo eléctrico y se escogerá la solución que consiga un buen equilibrio entre simplicidad y eficiencia en su montaje.

Seguidamente se establecerán una serie de valores necesarios para avanzar en el diseño, obtenidos unos a partir de las alternativas expuestas anteriormente y otros definidos de forma lógica acorde con la solución que se pretende ofrecer.

Una vez obtenidas las especificaciones técnicas necesarias, se calcularán las prestaciones de potencia que deberá tener el motor eléctrico para que el vehículo pueda circular sin problemas en las condiciones expuestas.

Posteriormente se procederá al cálculo de las características necesarias que debe tener el sistema de baterías del *powertrain*, de manera que se ajusten a las magnitudes de potencia calculadas del motor eléctrico y la autonomía que debe tener el vehículo.

Una vez conocida la totalidad de las especificaciones técnicas que debe cumplir el sistema solución, se realizará una búsqueda de componentes en el mercado y se seleccionarán los que se ajusten lo máximo posible a los valores obtenidos en los cálculos.

Con los componentes que forman el *powertrain* ya decididos, se hará también una estimación del precio del conjunto, sin tener en cuenta el coste de otros procesos. Este precio se incluirá en el presupuesto total del proyecto, donde también figurará la remuneración de las horas de trabajo.

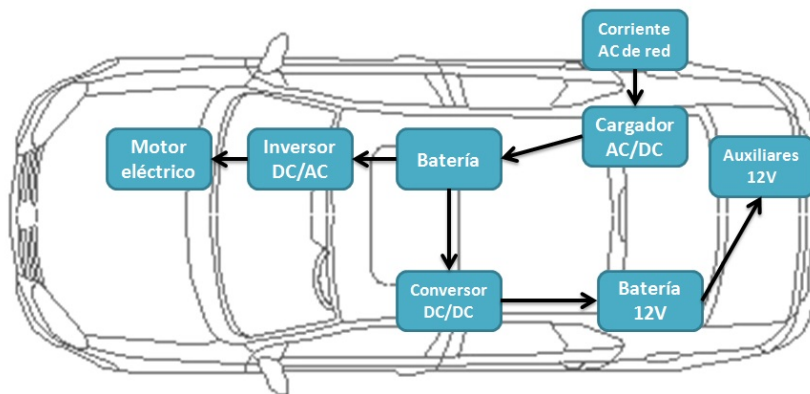
Finalmente se desarrollará una planificación y programación de las etapas necesarias para llevar a cabo el proyecto y su duración, además de un estudio de impacto ambiental.

Cabe destacar que el proyecto se limita a la caracterización del *powertrain* y de los elementos que lo componen, de forma que no se trabajarán otros aspectos del vehículo. Es decir, el estudio de otros componentes, como por ejemplo pueden ser las ruedas, el chasis, los elementos auxiliares o el circuito eléctrico que conecta todo el tren de potencia del coche, no entran dentro del diseño y se encuentran fuera del alcance de este proyecto.

## 7. Componentes básicos del POWERTRAIN eléctrico

Como se ha explicado en el **apartado 4**, el *powertrain* es el sistema de propulsión que utiliza un vehículo para moverse. Este sistema está formado por un gran número de componentes eléctricos y electrónicos en el caso de los vehículos eléctricos modernos, y en la realización del proyecto se tendrán en cuenta los que se consideran más importantes. Los sistemas principales que forman el tren de potencia son:

- El motor eléctrico
- Las baterías
- El controlador del motor
- El cargador interno del vehículo
- El sistema de gestión de la batería o BMS



**Figura 7.1-** Esquema de los elementos básicos del powertrain de un VE\*

Fuente: web oficial de Endesa Educa

Antes de analizar qué características necesitan tener los componentes del *powertrain* del vehículo eléctrico a diseñar, es necesario explicar qué es cada uno y cual es la función que desempeñan dentro del sistema, además de entender los principios básicos de su funcionamiento.

---

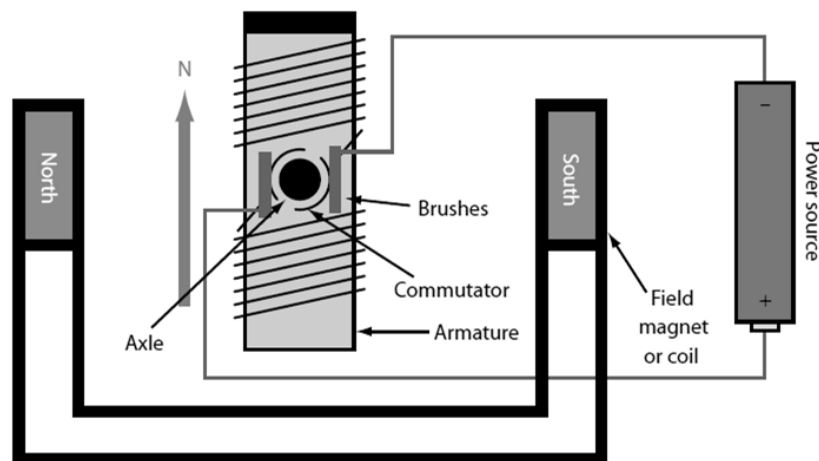
\*Nota: El inversor trabaja de forma bidireccional, es decir, también actúa como un convertidor AC/DC. El convertor DC/DC para elementos auxiliares no se considera elemento del tren de potencia.

## 7.1. Motor eléctrico

El EM (Electric Motor) es el dispositivo que convierte la energía eléctrica, proveniente de las baterías, en energía mecánica por medio de la acción de los campos magnéticos generados en sus bobinas. Esta energía mecánica es la que es capaz de mover las ruedas del vehículo. Los motores eléctricos son máquinas eléctricas rotatorias compuestas por un estator y un rotor. El estator es la parte fija de la máquina rotativa que suele acoger en su interior al rotor, la parte móvil.

### 7.1.1. Principio de funcionamiento

Los EM, tanto de corriente continua como los de corriente alterna, tienen el mismo principio de funcionamiento; éste se basa en la circulación de una corriente eléctrica por un conductor (bobina) que se encuentra dentro de la acción de un campo magnético. Es decir, cuando al bobinado del motor eléctrico se le aplica una corriente, esta interactúa con el campo magnético presente y se produce el movimiento del eje del motor, generando energía mecánica. La parte giratoria actúa de electroimán<sup>1</sup> que interacciona con la parte fija que funciona como imán permanente.



**Figura 7.2-** Componentes de un brushed DC Motor

Fuente: Mat Dirjish, "Electronic Design", 2012

En la **Figura 7.2** se ilustra un motor de corriente continua con escobillas<sup>2</sup> (*brushed DC Motor*). Este tipo de motor fue de los primeros en comercializarse. Consta de un campo magnético permanente (estator), unas escobillas, un conmutador y un eje bobinado (rotor), y una fuente de energía.

<sup>1</sup> Electroimán: barra de hierro que se imanta artificialmente por la acción de una corriente eléctrica que pasa por un hilo conductor arrollado a la barra.

<sup>2</sup> Escobilla: elemento conductor utilizado para efectuar el contacto eléctrico entre 2 partes en movimiento relativo.

El movimiento rotatorio del eje se produce por la atracción y repulsión de los polos magnéticos del rotor (electroimán) con los del estator (imán permanente); cuando el electroimán ha girado parcialmente, su polo norte se enfrenta cara a cara con el polo sur del estator, pero de inmediato se produce un cambio de sentido en la corriente de las escobillas del rotor provocado por el conmutador, recibiendo así la corriente de la batería en sentido opuesto y obligando al rotor a seguir girando.

### 7.1.2. Tipos de motores eléctricos actuales

Debido a los avances en el control del DC (Direct Current) que circula entre las baterías y el motor eléctrico, con el tiempo se han podido encontrar soluciones alternativas al convencional *brushed DC Motor*.

Los EM más modernos, aunque se rigen por el mismo principio físico explicado en el apartado anterior, se caracterizan por la ausencia de contacto físico entre sus componentes. Esta modificación comporta una mejora en su rendimiento y un aumento considerable de su vida útil.

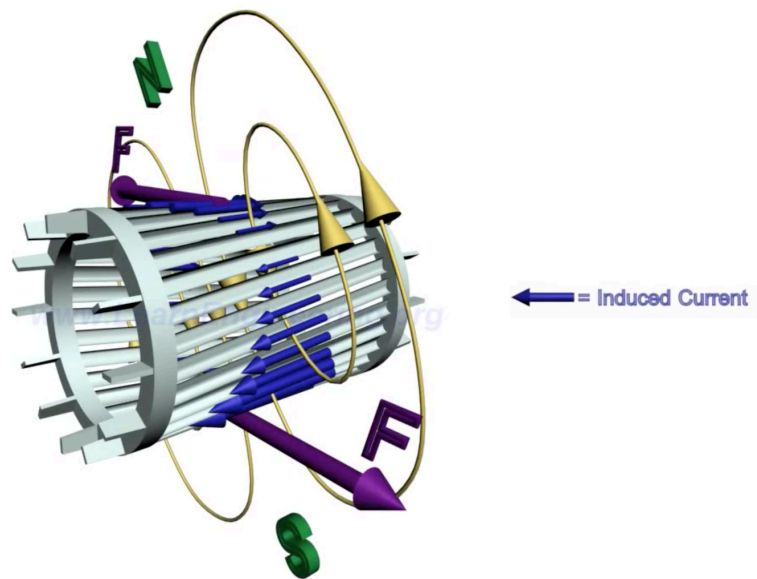
Por tanto, será importante conocer el funcionamiento y cómo se comportan los distintos EM presentes en el mercado actual para conocer las ventajas y desventajas que presenta cada uno. Así será posible escoger la solución que más convenga para el diseño del *powertrain*.

Actualmente, los motores más utilizados en la industria del VE son el motor AC asíncrono o de inducción, el motor AC síncrono de imanes permanentes, el motor AC síncrono de reluctancia conmutada o variable y el motor DC sin escobillas de imanes permanentes.

#### **Motor asíncrono o de inducción (AC)**

Su principal característica es que el giro del rotor no corresponde a la velocidad de giro del campo magnético producido por el estator. Este motor está formado por un rotor que puede ser de tipo jaula de ardilla o bobinado. En el estator (anillo cilíndrico de chapa magnética) se encuentran las bobinas inductoras que son trifásicas, desfasadas entre sí a 120°.

La corriente eléctrica necesaria para producir movimiento mecánico en el rotor se crea por inducción electromagnética del campo magnético que proviene del bobinado del estator. Al aplicar AC trifásica en las bobinas inductoras, se produce un campo magnético rotatorio en el estator, llamado campo estatórico. Este campo gira alrededor del rotor, de manera que induce una corriente eléctrica en el mismo, y, de acuerdo con la Ley de Lorentz, se crea una fuerza en el rotor que lo hace girar, formando de esta manera el campo rotórico. Este campo sigue el movimiento del campo estatórico, aunque a una velocidad distinta; de ahí el nombre de motor asíncrono. Este fenómeno de inducción se muestra en la **Figura 7.3**.



**Figura 7.3-** Fenómeno de inducción en el rotor de un motor asíncrono

Fuente: Learn Engineering.org

Entre las ventajas de este tipo de EM encontramos la alta eficiencia<sup>3</sup>, el bajo coste económico, la fiabilidad, el bajo ruido y vibraciones y el par constante. En cambio sus contras son su baja densidad de potencia, el bajo par en el arranque y el riesgo de sobrecarga, además del consumo de energía adicional debido a la corriente de inducción en el rotor.

Es uno de los motores más utilizados en la industria del VE, por ello Tesla Motors lo usa en todos sus modelos al igual que los pequeños fabricantes Mahindra o Tazzari.

#### **Motor síncrono de imanes permanentes (AC)**

Los motores síncronos son un tipo de motor de corriente alterna en el que la rotación del eje está sincronizada con la frecuencia de la corriente de alimentación. Su velocidad de giro es constante y depende de la frecuencia de la tensión de la red eléctrica a la que esté conectado y por el número de pares de polos del motor, siendo conocida esa velocidad como velocidad de sincronismo.

Con una velocidad de giro constante, siendo igual el giro del rotor que la velocidad del campo magnético creado por el estator, el motor síncrono de imanes permanentes puede ser de dos tipos; de flujo radial o de flujo axial, dependiendo de la posición del campo magnético de inducción, que puede ser perpendicular o paralelo al eje de giro del rotor.

---

<sup>3</sup> Eficiencia de un motor: relación entre la energía que se aprovecha de un motor y la energía necesaria para hacerlo funcionar. Se suele expresar en tanto por ciento.

Son más usados los de flujo radial. En cambio, los de flujo axial permiten ser integrados directamente en la rueda del vehículo, optimizando el espacio en el vehículo y simplificando los acoplamientos mecánicos entre motor y rueda, son los conocidos como “in-wheel motor”.

Las ventajas de este tipo de motor son su alto rendimiento, un control de velocidad sencillo, bajo ruido, vibración, tamaño y peso. Además proporcionan una elevada densidad de flujo sin consumir energía adicional (a diferencia de los motores AC de inducción). Aunque tienen un alto coste, junto con los motores asíncronos, son los más extendidos dentro de los VE e híbridos.

Son utilizados por Nissan, BMW, VW, Kia, BYD, Smart, el Outlander PHEV y el iMiEV (y sus “mellizos” Peugeot iON y Citroën C-Zero) de Mitsubishi o los híbridos de Chevrolet, Opel, Toyota y Lexus.

#### *Motor síncrono de reluctancia conmutada o variable (AC)*

En estos EM la corriente es conmutada entre las bobinas de cada fase del estator hasta crear un campo magnético que gira. El rotor, que está hecho con un material magnético con polos salientes, son influenciados por el campo magnético, atrayéndose y creando un par que mantiene el rotor moviéndose a velocidad síncrona. Estos motores no necesitan imanes permanentes ni escobillas.

Tienen a favor su elevado par, robustez, bajo coste, y, como los motores de inducción, presentan un elevado grado de fiabilidad. En contra tienen su baja potencia y la complejidad de su diseño.

Renault y su departamento “Electric Powertrain” desarrollaron el modelo 5A, un modelo de motor síncrono más eficiente que los de imanes permanentes.

#### *Motor sin escobillas de imanes permanentes (DC)*

Conocidos como “brushless”, estos motores poseen imanes permanentes situados en el rotor que funcionan mediante la alimentación secuencial de cada una de las fases del estator. Pueden ser “inrunner”, mayor velocidad de giro y menor par, o “outrunner”, menor velocidad y mayor par.

Aunque son usados mayormente en vehículos híbridos, los motores “brushless” ofrecen algunas ventajas para su uso en VE: su bajo ruido y rozamiento, robustez y ausencia de mantenimiento. Por ahora son motores poco experimentados, que tienen un precio elevado y poca potencia. Lo ha montado Honda en algunos de sus pre-series o prototipos eléctricos.



## 7.2. Conjunto de Baterías

Uno de los principales componentes de diseño del *powertrain* del VE son las baterías. Su importancia es tal que la autonomía y el precio del coche dependen en gran medida del tipo y tamaño de las mismas.

Las baterías son elementos que consisten en una o más celdas electroquímicas que son capaces de convertir la energía química que se almacena en ellas y transformarla en electricidad. Cada una de estas celdas consta de un electrodo<sup>4</sup> positivo, llamado cátodo, un electrodo negativo, llamado ánodo, y electrolitos<sup>5</sup> que ayudan a que los iones se muevan entre los electrodos, permitiendo que la corriente fluya fuera de la batería. Por tanto, es un dispositivo capaz de almacenar energía y de suministrarla.

Concretamente, el conjunto de baterías de un vehículo eléctrico sirve para almacenar la energía eléctrica obtenida durante la carga, ya sea mediante una fuente de alimentación externa o durante el proceso de frenada regenerativa (**apartado 7.3.1**), y para suministrar dicha energía al motor para que pueda realizar su función.

### 7.2.1. Principio de funcionamiento

Este acumulador de energía almacena la electricidad mediante elementos electroquímicos, un proceso con pérdidas mínimas que permite un rendimiento próximo al 100%. Las baterías, dispuestas a entregar esta energía en cualquier momento, soportan un número finito de ciclos de carga y descarga completos, llamado ciclo de vida.

Las baterías están compuestas por un conjunto de células, en cada una de las cuales tiene lugar una reacción química reversible donde se produce un intercambio de iones y electrones entre sus dos polos. En la “dirección de descarga”, se produce una corriente eléctrica que es capaz de activar el motor eléctrico que impulsa el VE, mientras que en la “dirección de recarga” iones y electrones vuelven a su situación original a partir de un aporte de energía externo.

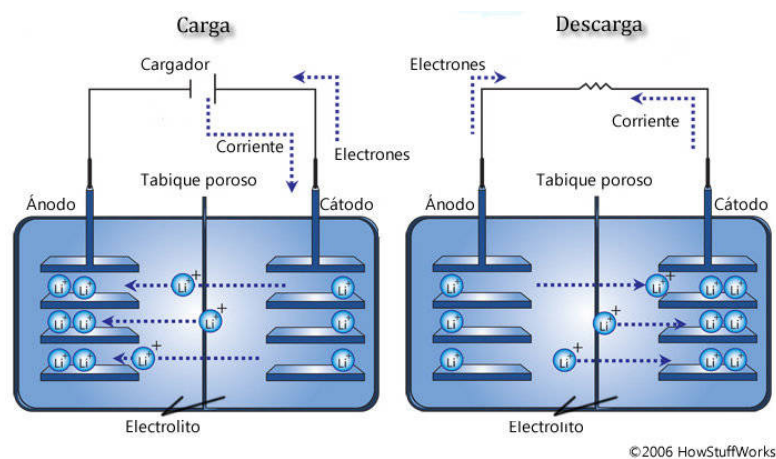
La explicación química del funcionamiento durante la descarga es que la batería aprovecha la energía que se desprende de reacciones de oxidación-reducción para producir una corriente eléctrica. A la inversa y mediante el uso de una corriente eléctrica para producir un cambio químico, tiene lugar el proceso de carga; esta corriente se obtiene a través de los cargadores del VE conectados a la red eléctrica o de la energía cinética recuperada en el proceso de frenada regenerativa (**apartado 7.3.1**).

---

<sup>4</sup> Electrodo: Extremo de un conductor en contacto con un medio, al que lleva o del que recibe una corriente eléctrica.

<sup>5</sup> Electrolito: sustancia que contiene en su composición iones libres, que hacen que se comporte como un conductor eléctrico.

La reacción de oxidación-reducción, conocida como “redox”, es un proceso donde uno de los componentes de la batería pierde electrones y el otro los gana, uno se oxida y otro se reduce respectivamente. Como ya se ha dicho, una batería está formada por dos electrodos llamados ánodo y cátodo, sumergidos en un electrolito. El primero de ellos se oxidará, mientras que el segundo ganará electrones, reduciéndose. Esto ocurre en el proceso de descarga, y es debido a que la electricidad tiene signo opuesto al flujo de electrones, por lo que esta irá desde el polo positivo (cátodo) hasta el negativo (ánodo). En el proceso de carga ánodo y cátodo se invierten para que el primero vuelva a ganar los electrones perdidos durante la conducción. Este proceso de carga y descarga se puede ver representado en la **Figura 7.4** que se muestra a continuación.



**Figura 7.4-** Proceso de carga y descarga de una batería de iones de Litio

Fuente: Bernstein Research & Ricardo, “Global autos: don’t believe the hype – analyzing the costs & potential of fuel-efficient technology”.

Los principales parámetros a tener en cuenta para seleccionar una batería destinada al vehículo eléctrico son:

- **Capacidad de carga:** también llamada capacidad del acumulador, es la carga que puede almacenar el elemento. Se mide en amperios-hora (Ah).
- **Intensidad de corriente máxima:** valor de intensidad máximo que puede suministrar la batería. Los motores de arranque de los automóviles, cuando se ponen en funcionamiento, exigen intensidades de corriente muy grandes a la batería (centenas de A) durante un breve tiempo.
- **Densidad energética:** es la cantidad de energía que puede suministrar la batería por cada kg. A mayor densidad energética mayor será la autonomía del VE o menor será su peso. Expresada en Wh/kg.
- **Potencia:** es la capacidad de proporcionar potencia en el proceso de descarga de la batería. A más potencia mejores prestaciones para el vehículo eléctrico. Expresada en W/kg.

- **Eficiencia:** es el rendimiento de la batería, la energía que realmente aprovecha en relación con la total que se utiliza. Medido en %.
- **Coste:** muy determinante, ya que de ello dependerá en gran medida el precio final del VE.
- **Ciclo de vida:** Ciclos completos de carga y descarga que soporta la batería antes de ser sustituida.

Las dos características fundamentales que determinan el comportamiento, rendimiento y duración de una batería son, por un lado, los elementos químicos escogidos para dar lugar a la reacción dentro de cada célula y, por otro, la electrónica que controla todo el proceso de descarga y recarga. El sistema de control electrónico se estudiará más adelante (**apartado 7.3.3**); a continuación se analizarán los distintos tipos de baterías atendiendo a las ventajas y desventajas que presentan cada una según los elementos químicos que las formen.

### 7.2.2. Tipos de baterías para vehículo eléctrico

Existen varias tipologías de baterías, atendiendo a su química, cuyo desarrollo actual las hace adecuadas para alimentar el motor de un coche eléctrico: las baterías de Plomo-Ácido, las baterías de Metal-Níquel y las baterías de Ion-Litio, entre otras. Escoger entre unas u otras es siempre una decisión de compromiso entre densidad energética, potencia específica, costes, seguridad y durabilidad.

#### *Baterías de Plomo-Ácido*

Son la opción de bajo coste, y se han utilizado durante décadas permaneciendo casi inalteradas desde su invención en el Siglo XIX, siendo este el tipo de baterías más antiguo.

Entre sus ventajas, además del bajo coste y estandarización universal, se encuentran su buena potencia específica (W/kg), buen comportamiento en un amplio rango de temperaturas, buena retención de la carga en el tiempo y son relativamente fáciles de reciclar.

Sus desventajas son el excesivo peso, la toxicidad del plomo y su lenta recarga, por ello no son las baterías ideales para el coche eléctrico. Sólo pueden almacenar unos **40 Wh/kg**, una densidad energética muy pobre como se verá más adelante.

#### *Baterías de Níquel-Metal*

Han sido las preferidas por el archiconocido Toyota Prius durante sus más de 10 años de historia, por lo que han demostrado sobradamente su capacidad para responder con solidez en las entrañas de un híbrido no enchufable.

Su potencia específica es correcta, su ciclo de vida largo y no presentan problemas medioambientales. Sus **60 Wh/kg** las hace superiores a las de Plomo-Ácido.

De entre los diferentes tipos dentro de esta categoría de baterías se encuentran las baterías de Níquel-Cadmio, Níquel-Hierro y Níquel-Hidruro metálico.

El alto coste de adquisición de los elementos de la batería de **Níquel-Cadmio** hace que no sean la solución elegida por los fabricantes, estando más orientadas a aviones, helicópteros o vehículos militares, dado su gran rendimiento a bajas temperaturas.

Las baterías de **Níquel-Hierro** o de “ferroníquel” no son montadas en la actualidad en los vehículos ya que tienen una escasa potencia y eficiencia.

Similares a las de níquel-cadmio, las baterías de **Níquel-Hidruro metálico** mejoran la capacidad de estas, y reducen el efecto memoria, además de ser menos agresivas con el medio ambiente. En contra tienen su constante mantenimiento y su deterioro frente a altas temperaturas, altas corrientes de descarga o sobrecargas. Estas baterías generan demasiado calor y se recargan lentamente.

Además, todas estas baterías tienen un alto índice de descarga en periodos de inactividad (pierden el 30% de la carga en un mes paradas) y su coste de producción es algo elevado por incorporar tierras raras<sup>6</sup> en el electrodo positivo.

### **Baterías de Ion-Litio**

Su voltaje, densidad energética, potencia específica, carga utilizable, eficiencia de recarga y ciclo de vida son muy superiores a las de sus dos rivales, al tiempo que su índice de descarga es mucho menor. En comparación, disponen del doble de densidad energética que las baterías níquel-cadmio con una tamaño del orden de un tercio más pequeñas.

Como inconveniente, cabe señalar su menor robustez ante variaciones de voltaje, que obliga a incorporar costosos sistemas de gestión de las baterías (**apartado 7.3.3**) para su protección y correcto funcionamiento. De ello y de su propia composición química se deriva un coste de producción también mayor que sus rivales, tema a tener muy en cuenta dada su extrema relevancia en la competitividad del coche eléctrico.

Aún así, las baterías de Ion-litio representan a día de hoy una buena elección para montar en un VE. Al no ser una tecnología totalmente madura, y encontrarse en continuo desarrollo, los avances las hacen tener un gran margen de mejora.

---

<sup>6</sup> Tierras raras: nombre común de 17 elementos químicos: escandio, itrio y los 15 elementos del grupo de los lantánidos. Tienen este nombre porque es poco común encontrarlas en una forma pura en la corteza terrestre.

Aunque comúnmente se hable de baterías de Ion-Litio como si fueran una única cosa, se utiliza probablemente una denominación demasiado genérica y que abarca muchas posibilidades. Aplicables al caso de VE, tenemos las siguientes distintas opciones:

- **Litio-Cobalto** ( $\text{LiCoO}_2$ ): densidad energética de **170-185 Wh/kg**. Son difícilmente utilizables en VE porque sólo aguantan unos 500 ciclos de recarga y en caso de accidente y rotura pueden generar reacciones exotérmicas que desemboquen incluso en incendio.
- **Litio-Hierro-Fosfato** ( $\text{LiFePO}_4$ ): también conocidas como LFP, tienen una densidad energética de **90-125 Wh/kg**. Son más seguras que las anteriores, por tener mayor estabilidad térmica y química al no usar cobalto. Su densidad energética no es tan elevada, pero se pueden considerar un salto adelante en seguridad y también en durabilidad, con hasta 2.000 ciclos de recarga.
- **Litio-Manganeso** ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ): también conocidas como LMO, tienen una densidad energética de **90-110 Wh/kg**. También son más estables térmicamente que las de cobalto y soportan un mayor voltaje, pero se encuentran de nuevo con una inferior densidad energética. La gran ventaja es que el manganeso no es contaminante.
- **Litio-Níquel-Cobalto-Manganeso** ( $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$ ): también conocidas como NMC, tienen una densidad energética de **155-190 Wh/kg**. Excelente compromiso entre muy buen rendimiento y coste razonable, se empiezan a utilizar en coches eléctricos masivamente. Soportan 1.500 ciclos y voltajes de los más altos.
- **Litio-Titanio** ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ): densidad energética de **65-100 Wh/kg**. Son las más duraderas, pues aguantan hasta 12.000 ciclos de recarga (unas 10 veces más que cualquiera de las otras) pero su densidad energética actual es baja y su coste, muy elevado.

### *Otras baterías*

Cómo ya se ha comentado, la industria de las baterías para VE está en constante evolución y el diseño de nuevos tipos de batería a la orden del día. Aunque la mayoría de las siguientes se encuentran aún en fase experimental, es interesante tenerlas también en cuenta para proyectos futuros y para dar posibles alternativas que puedan ser viables a corto o medio plazo si se logran los avances tecnológicos necesarios para implementarse de manera segura y fiable.

#### – Batería ZEBRA:

Estas baterías, también llamadas de sal fundida, trabajan a 250°C y tienen como electrolito cloro aluminato de sodio triturado. Es una batería compleja, de mayor

contenido químico, pero que consigue unas características de energía y potencia interesantes. En desuso, el electrolito se solidifica, por lo que necesita un tiempo de fundición que puede llegar a ser de dos días para que alcance la temperatura optima y ofrezca plenamente su carga. Tienen el mejor ciclo de vida de todas las baterías, pero requieren ocupar mucho espacio y su potencia es baja.

– Batería de Aluminio-aire:

Consideradas “pilas de combustible” por la necesidad de sustituir los electrodos de metal gastados por unos nuevos. Con una capacidad de almacenamiento de hasta diez veces más que las de tipo Ion-litio y una densidad energética fuera del alcance del resto, este tipo de batería no ha tenido una buena aceptación comercial debido a sus problemas de recarga y de fiabilidad. Se encuentran en fase experimental.

– Batería Zinc-Aire:

Desarrolladas por una compañía suiza, y en fase experimental, pero más avanzada que las de Aluminio-Aire, estas baterías necesitan obtener el oxígeno de la atmosfera para generar una corriente. Tiene un alto potencial energético, fiabilidad y son capaces de almacenar el triple de energía que las de Ion-litio en el mismo volumen y con la mitad del coste. Según algunos expertos, el zinc se posiciona como el combustible eléctrico del futuro.

### 7.2.3. Supercondensadores y sistemas de carga híbridos

Una alternativa posible a las baterías electroquímicas convencionales explicadas anteriormente y que está ganando fuerza en los últimos años son los supercondensadores. Los supercondensadores, también conocidos por las siglas EDLC (Electric Double-Layer Capacitor), son dispositivos capaces de almacenar grandes cantidades de energía eléctrica en forma de cargas electrostáticas y cederla rápidamente en el momento necesario.

Sus características especiales los hacen muy interesantes para aplicaciones en automóviles eléctricos y, aunque su tecnología se encuentra aún en fase de desarrollo, ya se han implementado en algunos VE. La empresa española Irizar, por ejemplo, tiene actualmente en circulación en España tres autobuses eléctricos (uno en el País Vasco y dos en Barcelona) que implementan la tecnología de los supercondensadores.

#### *Funcionamiento de los supercondensadores*

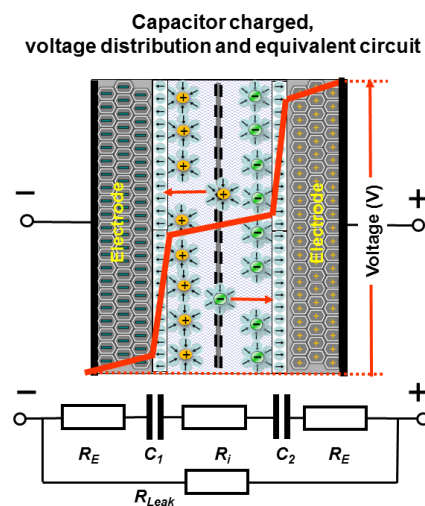
Los EDLC están formados por pares de placas conductivas separadas por un medio dieléctrico<sup>7</sup>. Su funcionamiento es muy similar al de un condensador a gran escala.

---

<sup>7</sup> Dieléctrico: material con baja conductividad eléctrica, es decir, aislante.

Sin embargo, los supercondensadores disponen de mayor capacidad (del orden de 5000 Faradios): miles de veces mayor que la capacidad de los condensadores electrolíticos de alta capacidad, pudiéndose además cargar en muy pocos minutos y descargar en periodos de tiempo aun menores.

Los supercondensadores son sistemas donde, a diferencia de las baterías, la obtención de energía no se realiza a partir de una reacción química. Los EDLC son dispositivos que basan su funcionamiento en el almacenamiento de energía asociado a la acumulación de carga eléctrica entre las láminas del condensador gracias al medio aislante. Dicho de otra forma, se establece una diferencia de potencial entre dos superficies conductoras separadas por un dieléctrico. Cada una de estas superficies adquiere una carga eléctrica, una de las cuales es positiva y la otra negativa (**Figura 7.5**).



**Figura 7.5-** Celda individual de un EDLC y esquema eléctrico equivalente

Fuente: Wikimedia

El área de las placas es el factor que más influye en su capacidad. Para aumentarla, se puede aumentar su rugosidad o incluso aportarle porosidad. Por eso el futuro de los supercondensadores son los nanotubos de grafeno<sup>8</sup>, que tienen una porosidad mucho mayor a la del carbono utilizado habitualmente. Esta porosidad también hace que la velocidad de carga y descarga del EDLC sea mayor. A pesar de que la vida útil disminuye con la capacidad, esto no supone un problema pues se ha visto que la vida media es superior a los 20 años, sin pérdidas apreciables en la tensión.

<sup>8</sup> Nanotubo de grafeno: estructura tubular de un nanómetro de diámetro formada por grafeno, que es cristal de carbono en el que los átomos están dispuestos en un plano de forma hexagonal.



Aunque, como ya se ha comentado, su tecnología se encuentra en desarrollo y aún es pronto para que los supercondensadores reemplacen a las baterías convencionales, existe una aplicación que se está investigando y que tiene un gran potencial de cara a los próximos años. Esta alternativa consiste en un sistema híbrido que combina las baterías de litio con los supercondensadores en un mismo VE.

### *Sistema híbrido de baterías y supercondensadores*

Las características las baterías de litio y los supercondensadores son complementarias. Por un lado, las baterías de litio ofrecen una buena **densidad energética**, necesaria para almacenar una mayor cantidad de energía, de manera que pueden entregarla al motor de forma constante y durante largos periodos de tiempo. La desventaja que presentan es que no son útiles entregando grandes picos de potencia en poco tiempo, ya que se sobrecalientan y disminuye su vida útil.

Por contrapartida, los supercondensadores son capaces de entregar de forma casi instantánea toda la energía que almacenan, ya que tienen una gran **densidad de potencia**. Esta cualidad también se extiende a la recarga.

Gracias a estas características, la combinación de baterías de litio y supercondensadores puede hacer que un coche eléctrico tenga una autonomía aceptable además de una gran aceleración. La autonomía la proporcionan las baterías y la aceleración los EDLC. Además, el uso de EDLC puede aumentar la vida de las baterías de litio, ya que no serán las encargadas de entregar los picos de potencia, evitando así sobrecalentamientos y degradación prematura.

Además, la existencia de supercondensadores garantiza unos mejores sistemas de frenada regenerativa (**apartado 7.3.1**), ya que recuperan una mayor cantidad de energía y por lo tanto, aumenta la eficiencia del sistema de carga. También podría evitar la necesidad de sobredimensionar los packs de baterías para permitir una mayor entrega de potencia, lo que se traduce en una reducción de peso y coste importante en el diseño.



### 7.3. Bloque electrónico de potencia

Toda la energía que entra o sale del motor y las baterías de un coche eléctrico pasa necesariamente por **el regulador eléctrico o bloque electrónico de potencia**. Por tanto, su eficiencia influye directamente en la autonomía del vehículo.

El bloque electrónico de potencia es el auténtico director del sistema energético del coche, sin el cual ni las baterías ni el motor eléctrico podrían desempeñar sus funciones. Está compuesto por varios subsistemas eléctricos y electrónicos:

- El controlador del motor
- El cargador interno del vehículo eléctrico
- El sistema de gestión de la batería
- El convertidor DC/DC para elementos auxiliares

Gracias a estos elementos el sistema gestiona el flujo de corriente que entra en las baterías, el que sale de ellas, y el flujo que circula entre las baterías y el motor en ambos sentidos:

- Cuando el motor provoca el avance el coche
- Cuando el motor recarga las baterías (actúa de generador durante la frenada)

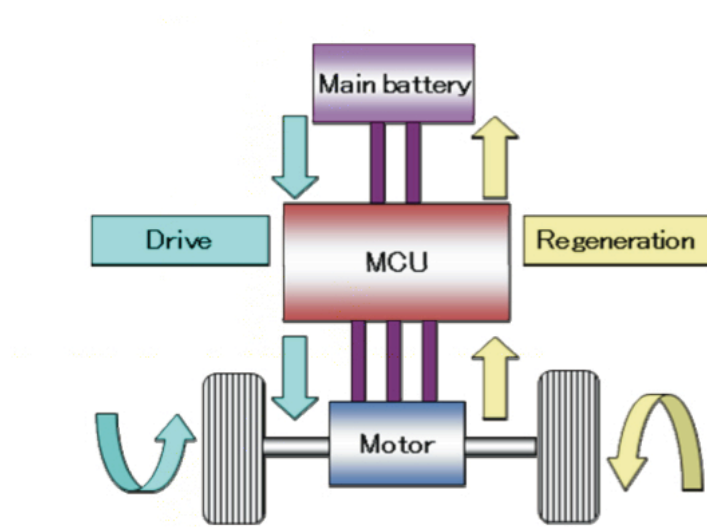
En el sistema formado por el regulador electrónico los elementos trabajan transformando la caudalosa corriente eléctrica que pasa a través de ellos, por lo que generan calor y la consiguiente pérdida energética. Para evitar un sobrecalentamiento de estos elementos, es necesario un sistema de ventilación y refrigeración que los mantenga a una temperatura de trabajo aceptable.

De los cuatro subsistemas descritos anteriormente, solamente se profundizará en el estudio de los tres primeros, ya que el convertidor de potencia para elementos auxiliares (como pueden ser la pantalla de información, las luces del coche o la bocina), no forma parte estrictamente del *powertrain* del VE, ya que no contribuye en el desplazamiento del vehículo.

#### 7.3.1. Controlador del motor

El controlador del motor o MCU (*Motor Control Unit*) funciona de forma bidireccional entre el motor eléctrico y las baterías. Por un lado, actúa como un inversor, es decir, como un convertidor de corriente continua procedente de las baterías a corriente alterna para alimentar el motor. Por otro lado, el controlador del motor también se encarga de la conversión de corriente alterna a corriente continua (corriente necesaria para recargar las baterías) cuando el EM pasa a actuar como un generador, es decir, durante el proceso de frenada regenerativa.

En la **Figura 7.6** se puede observar esquemáticamente como funciona el MCU en ambos casos. A continuación se analizan estas dos funciones por separado.



**Figura 7.6-** Esquema de funcionamiento básico del MCU

Fuente: web oficial Mitsubishi Motors

#### **Funcionamiento del inversor (Convertidor DC/AC)**

El inversor convierte electricidad procedente de una fuente de corriente de tipo continua, como lo es la batería del VE, en corriente alterna, necesaria para mover el motor eléctrico del coche.

Su principio de funcionamiento se basa en un sistema de interruptores, que cambia la polaridad de la corriente extraída de las baterías de forma cíclica y regularmente. Esas bruscas fluctuaciones inducen una corriente alterna en el motor, con la frecuencia y voltaje requeridos en cada momento, según la potencia solicitada por el conductor (mediante el pedal del acelerador) y las revoluciones del motor en ese instante.

La modificación de la señal de entrada se realiza a partir del control electrónico con transistores que funcionan como interruptores controlados. Pueden ser de dos tipos:

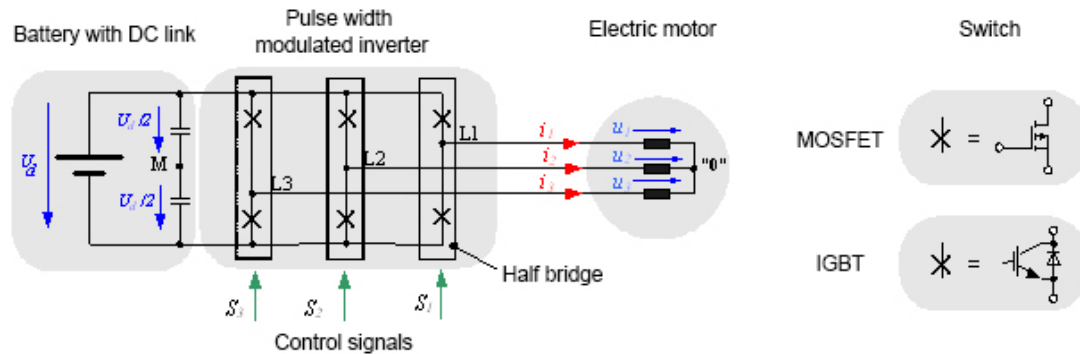
- MOSFET<sup>9</sup> (*Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor*)
- IGBT<sup>10</sup> (*Insulated-Gate Bipolar Transistor*)

---

<sup>9</sup> MOSFET: transistor utilizado para amplificar o conmutar señales electrónicas.

<sup>10</sup> IGBT: dispositivo semiconductor que generalmente se aplica como interruptor controlado en circuitos de electrónica de potencia.

Estos transistores conmutan (dejan pasar o no la corriente) a partir de las señales de control que proporciona un sistema PWM<sup>11</sup> (*Pulse Width Modulation*) para crear la señal alterna de salida. Una vez convertida, esta señal alterna llega al motor eléctrico con la magnitud adecuada (**Figura 7.7**).



**Figura 7.7-** Esquema eléctrico de un inversor trifásico con control PWM

Fuente: HBM Test and Measurement

### Funcionamiento del rectificador (AC/DC) y la frenada regenerativa

Se ha comentado que el controlador del motor también permite realizar el proceso contrario al inversor y puede convertir la corriente alterna que proviene del motor eléctrico en corriente continua para destinarla a las baterías. Esto es posible gracias a que el motor eléctrico es capaz de actuar como generador cuando utiliza la energía cinética perdida durante la frenada (o la energía captada cuando se circula por un tramo descendente) y la aprovecha para cargar las baterías del vehículo, fenómeno que se conoce como frenada regenerativa.

Este proceso permite aprovechar la energía que se hubiese perdido en forma de calor en los frenos de un coche convencional y utilizarla en beneficio de la autonomía del VE. Aparte de la recuperación energética, la frenada regenerativa permite que los frenos de estos vehículos funcionen mucho menos y con ello sufran un desgaste mucho menor, lo que redundará en unos intervalos de mantenimiento mucho más largos y en unas fatigas mucho menores.

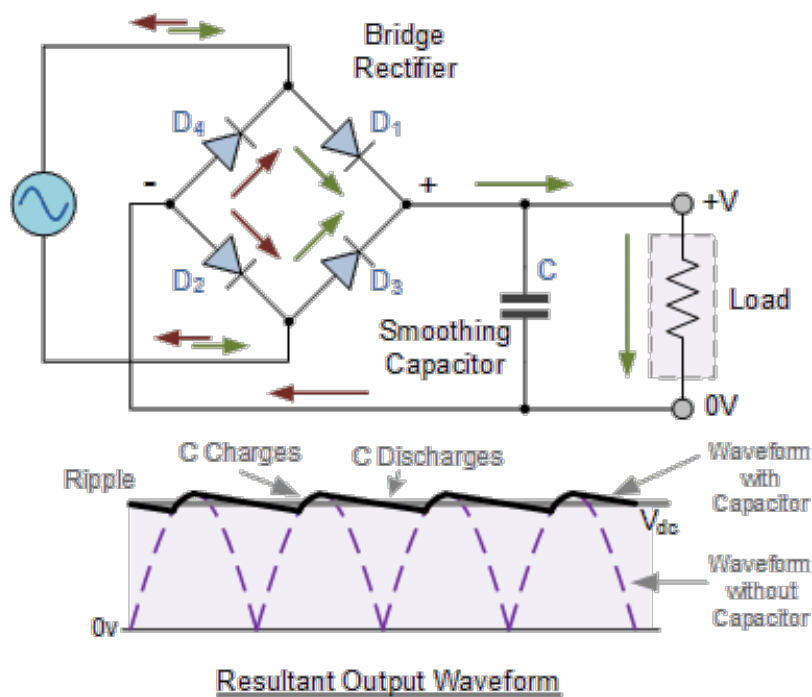
Ahora bien, la frenada regenerativa también presenta algunas limitaciones. A bajas velocidades la energía cinética del vehículo es tan baja que el aprovechamiento energético es casi despreciable. Además, hay que tener en cuenta que si la batería está completamente cargada no se puede absorber la energía disipada en el proceso de frenado, por lo que los frenos convencionales son igualmente necesarios.

<sup>11</sup> PWM: técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, que puede usarse para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

### 7.3.2. Cargador interno del VE

El cargador interior es el dispositivo que se encarga de transformar la energía que proviene de la red eléctrica y adaptarla para que pueda ser aceptada por el sistema de baterías del vehículo eléctrico. El cargador de la batería está formado por dos elementos principales dispuestos de manera consecutiva, los cuales adaptan la corriente eléctrica en dos procesos distintos.

El primero es un convertidor AC/DC, o rectificador, el cual se encarga de transformar la corriente alterna de la red eléctrica en corriente continua, siguiendo el mismo principio de funcionamiento que el rectificador del controlador del motor. El segundo dispositivo es un convertidor DC/DC, que adapta la corriente continua que sale del rectificador para llevarla a la batería. Este convertidor reduce el voltaje de entrada, que suele ser demasiado alto, y lo ajusta al valor de tensión nominal de la batería.



**Figura 7.8-** Circuito rectificador con puente de Graetz y forma de onda de salida

*Fuente: Electronics Tutorials Team, Electronics Tutorials*

Como se puede observar en la **Figura 7.8**, el circuito rectificador está formado por un puente rectificador o puente de Graetz y por un condensador. El puente rectificador está formado por cuatro diodos que permiten convertir la totalidad de la forma de onda de entrada, que tiene polaridad positiva y negativa al tratarse de corriente alterna, en una polaridad constante positiva en la salida mediante la inversión de los semiciclos negativos de la forma de onda de entrada. El condensador permite filtrar el rizado de la corriente de salida del puente

rectificador hasta alcanzar casi una señal de salida constante.

El convertidor DC/DC, por su parte, puede ser un transformador que ajusta la salida del rectificador a la tensión de carga que requieran las baterías.

### 7.3.3. Sistema de gestión de la batería (BMS)

Un BMS (*Battery Management System*) o sistema de gestión de la batería monitoriza una serie de parámetros de la batería y con esos parámetros y un algoritmo que los relaciona se encarga de realizar funciones para que el uso de la batería se encuentre dentro de unos estándares que consideremos aceptables y seguros y también obtener información relevante sobre su estado.

Obviamente cuanto más compleja sea una batería, o la función de esta, más importancia adquiere el BMS y más funciones realizará. En el caso del VE, el BMS puede llegar a realizar las siguientes operaciones:

- Toma de datos (voltajes, intensidades...)
- Determinar el estado de la batería
- Controlar la carga y descarga de la batería
- Equilibrado eléctrico
- Gestión térmica
- Gestión de seguridad
- Comunicación con la interfaz de usuario

Cuanta mayor sea la diversidad de funciones que pueda llegar a ofrecer el BMS, el tratamiento que recibirá la batería, en general, será mejor, cosa que permitirá alargar su vida útil. Cada una de estas operaciones son llevadas a cabo dentro del BMS por unos subsistemas distintos. A continuación se explican los más relevantes.

El sistema de **toma de medidas** se encarga de la recogida de información para el BMS. Los parámetros que toma para el BMS son los voltajes, corrientes y temperatura de cada célula así como la temperatura ambiente. La medida de voltaje y temperatura se efectúa con la ayuda de circuitos integrados, y para la corriente se usa una resistencia de precisión.

El sistema de **detección de fugas** es necesario ya que el elevado voltaje de las baterías en los VE supone un riesgo de que ocurra un defecto de aislamiento. Los BMS implementados para este tipo de aplicaciones incorporan un sistema el cual en caso de detectar un defecto eléctrico envía una señal a la unidad de control para

que se activen los protocolos de seguridad correspondientes. Para esta detección unos sensores se encargan de medir el asilamiento entre la batería y el chasis (tierra), y si este baja de unos valores mínimos da orden de aislar la batería mediante la apertura de los contactores<sup>12</sup> que conectan esta. La detección de una corriente excesiva también provocaría el aislamiento de la batería.

El sistema que **controla el estado de la carga** o SOC (*State of Charge*) es primordial, ya que es uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta para la carga y descarga de la batería. El SOC se define como la capacidad que tiene la batería en función de su capacidad nominal. Controlar este valor permite que la carga y descarga de la batería se produzca dentro de unos valores adecuados a fin alargar su vida útil. La obtención de este valor no es directa, sino que implica la medida del voltaje de la batería, la corriente, la temperatura y otra información perteneciente a la batería con la que se trabaja.

Este parámetro que indica el estado de la carga no solo es útil para definir cuanta autonomía le queda a un VE, sino que tiene otras funciones más importantes. Una de estas tiene relación con el sistema de frenados regenerativos, mediante el cual se aprovecha la energía que se disipa en la frenada para cargar la batería. Si el SOC está a un nivel suficientemente alto, el BMS no debe permitir que se produzca el frenado regenerativo, ya que la batería no puede absorber más energía y se encuentra suficientemente cargada.

El sistema de **gestión térmica** realiza el control de la temperatura de las células de la batería. El sistema de medida le envía las temperaturas de cada célula y en función de estos valores decidirá si se debe enfriar la batería, calentarla o dar por buena su temperatura. La mayor dificultad que se presenta en este control es el hecho de tener que transferir el calor desde las células hacia el exterior para enfriarlas. Esto se debe a que las resistencias térmicas<sup>13</sup> del electrolito y el encapsulado de plástico de las células y de la batería tienen valores considerablemente altos. Para el enfriamiento de la batería se usan ventiladores o métodos de refrigeración líquida, en función del calor a disipar.

---

<sup>12</sup> Contactor: interruptor automático que sirve para establecer o interrumpir el paso de corriente. Es capaz de restablecer los enlaces entre distintos circuitos o aparatos eléctricos.

<sup>13</sup> Resistencia térmica: propiedad que representa la capacidad del material de oponerse al flujo del calor.

## 8. Alternativas en el mercado

Antes de proceder con el cálculo de las características técnicas de los elementos que forman el *powertrain* a diseñar, es necesario analizar primero las alternativas que se presentan actualmente en el mercado en relación a vehículos eléctricos de prestaciones similares.

El análisis de los distintos modelos y sus respectivas especificaciones técnicas puede servir como referencia para luego establecer un valor adecuado para los parámetros que interesen durante el diseño. Una vez hechos los cálculos, también pueden usarse para verificar que éstos se hayan realizado correctamente. Además, comparando las diferentes alternativas se pueden detectar cuales son los puntos fuertes y cuales son los aspectos con margen de mejora de cada modelo.

A priori se dispone de la ventaja de tener muy bien definido y acotado el tipo de VE para el que va destinado el *powertrain* a diseñar, por lo cual las alternativas que se planteen deben corresponder a vehículos muy parecidos a la solución final en cuanto a diseño y dimensiones. En este apartado se escogerán algunos modelos de coches de distintas marcas y se pondrán en común sus especificaciones técnicas más relevantes para el estudio.

En el mercado actual existen muchas marcas que apuestan por los modelos de VE, por lo que se tiene acceso a una amplia gama de coches con diversas prestaciones. Para este estudio se han escogido los siguientes:

- El Piaggio Porter Eléctrico, tipo furgón acristalado
- El Mahindra e2o (variante P6)
- El Mitsubishi i-MiEV
- El Citroën C-Zero
- El Peugeot iOn

Las características técnicas de cada uno se pueden observar en la siguiente tabla. Algunos de los parámetros no se ven reflejados ya que el fabricante no los proporciona.

| <i>Modelo</i>                    | <i>Piaggio Porter</i>           | <i>Mahindra e2o</i> | <i>Mitsubishi i-MiEV</i>    | <i>Citroën C-Zero</i>          | <i>Peugeot iOn</i>          |
|----------------------------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| <i>Número de plazas</i>          | 4                               | 4                   | 4                           | 4                              | 4                           |
| <b>DIMENSIONES (mm)</b>          |                                 |                     |                             |                                |                             |
| <i>Longitud</i>                  | 3405                            | 3590                | 3475                        | 3470                           | 3475                        |
| <i>Anchura</i>                   | 1395                            | 1575                | 1475                        | 1792                           | 1475                        |
| <i>Altura</i>                    | 1870                            | 1585                | 1610                        | 1608                           | 1608                        |
| <b>MASAS (kg)</b>                |                                 |                     |                             |                                |                             |
| <i>En vacío</i>                  | 1400                            | 940                 | 1100                        | 1450                           | 1195                        |
| <i>Carga útil</i>                | 435                             | 320                 | 350                         | 330                            | 255                         |
| <b>MOTOR</b>                     |                                 |                     |                             |                                |                             |
| <i>Tipo</i>                      | DC con excitación independiente | AC de inducción     | Síncrono imanes permanentes | Síncrono de imanes permanentes | Síncrono imanes permanentes |
| <i>Potencia en continuo (kW)</i> | 10,5                            | 19                  | 35                          | 35                             | 35                          |
| <i>Potencia máxima (kW)</i>      | --                              | --                  | 49                          | 49                             | 49                          |
| <i>Par nominal (Nm a r.p.m.)</i> | 55 a 1800                       | 70 a 1000           | --                          | --                             | 65 a --                     |
| <i>Par máximo (Nm)</i>           | 215                             | --                  | 196                         | 196                            | 196                         |
| <b>CONSUMO</b>                   |                                 |                     |                             |                                |                             |
| <i>Energético (Wh/km)</i>        | --                              | 88                  | 125                         | 126                            | 126                         |
| <i>Autonomía (km)</i>            | 110                             | 110                 | 160                         | 150                            | 150                         |
| <b>BATERÍA</b>                   |                                 |                     |                             |                                |                             |
| <i>Tipo</i>                      | Plomo Gel                       | Ion-Litio           | Ion-Litio                   | Ion-Litio                      | Ion-Litio                   |
| <i>Capacidad energética(kWh)</i> | 17                              | 11                  | 16                          | 15                             | 14,5                        |
| <b>VELOCIDAD MÁX. (km/h)</b>     | 55                              | 80                  | 130                         | 130                            | 130                         |
| <b>P.V.P. (€)*</b>               | 29.000                          | 19.000              | 30.500                      | 25.000                         | 23.000                      |

**Tabla 8.1- Alternativas de mercado de vehículos eléctricos**

\*Precio aproximado del vehículo de serie, existe una notable variabilidad según accesorios y prestaciones extra.



El factor más importante a tener en cuenta es que la forma del chasis, el tamaño y el peso se asemejan en todos los casos a lo que se busca en el diseño. Por tanto, estos datos serán útiles a la hora de establecer pesos en vacío, con carga y calcular resistencias aerodinámicas, entre otros.

En cuanto al valor de la potencia del motor y la capacidad de las baterías, es posible comenzar a establecer unos márgenes de referencia observando las características técnicas en la tabla. Las prestaciones del *powertrain* de este proyecto deberán ser algo mayores que las de la Piaggio Porter, que es un modelo menos potente, y a su vez menores que las del Mitsubishi i-MiEV, el Citroën C-Zero y el Peugeot iOn, que son modelos un poco más potentes y que alcanzan velocidades superiores a las que necesita el vehículo objeto de estudio.

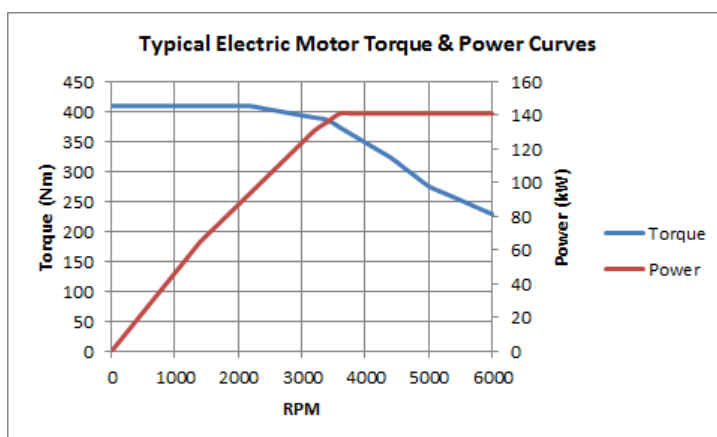
En el apartado de **Anexos I**, se puede observar el aspecto que tienen cada uno de los modelos de las alternativas de mercado propuestas.

## 9. Configuración del sistema de propulsión

El sistema de propulsión del VE se puede montar de varias maneras dentro del vehículo, ya que, a diferencia del vehículo de combustión, la energía se desplaza a través de los cables y no a través de sistemas mecánicos, lo que hace que su montaje sea muy flexible. La mayoría de los VE modernos utilizan una configuración que consiste en un único módulo formado por el motor eléctrico, el diferencial<sup>14</sup> y una marcha fija. Esta ha sido la configuración escogida para el diseño del *powertrain* de este proyecto, dada su relativa simplicidad y ventajas que se explican a continuación.

El diferencial permite girar a las ruedas con una velocidad angular diferente para evitar el deslizamiento de las ruedas delanteras durante las curvas, donde éstas tienen centros instantáneos de rotación<sup>15</sup> distintos. Este elemento es necesario si se quiere utilizar un único motor eléctrico en el *powertrain*.

Los VE modernos utilizan una marcha fija, es decir, una relación de transmisión<sup>16</sup> constante que permite aprovechar toda la flexibilidad y potencial de un motor eléctrico. La ventaja de este tipo de motores es que tienen un par máximo constante a bajas velocidades, ideal para el proceso de aceleración, y además ofrece una potencia constante a medida que se aumenta la velocidad y llega hasta las revoluciones máximas del motor.



**Figura 9.1-** Curva típica de par y potencia de un motor eléctrico

*Fuente: Victor Barreto, Why Hybrid Electric Vehicles Are More Efficient Than Conventional Ones, 2015*

<sup>14</sup> Diferencial: elemento mecánico que permite que las ruedas derecha e izquierda de un vehículo giren a velocidades diferentes.

<sup>15</sup> Centro instantáneo de rotación: referido al movimiento plano de un cuerpo, se define como el punto del cuerpo o de su prolongación en el que su velocidad instantánea es nula.

<sup>16</sup> Relación de transmisión: relación entre las velocidades de rotación de dos engranajes conectados entre sí, donde uno de ellos ejerce fuerza sobre el otro.

Por tanto, a diferencia de los vehículos con motores de combustión, no es necesario disponer de un cambio de marchas para obtener distintas relaciones de par-velocidad. Este factor supone una gran ventaja, ya que se puede prescindir del embrague<sup>17</sup> y la caja de cambios<sup>18</sup>, que no solo simplifica el diseño, sino que además reduce el peso y las dimensiones del montaje.

---

<sup>17</sup> Embrague: Mecanismo que permite unir o separar el eje del cambio de velocidades (cambio de marchas) de un vehículo al movimiento del motor.

<sup>18</sup> Caja de cambios: Caja que contiene los mecanismos de los cambios de velocidad en los vehículos automóviles.

## 10. Especificaciones técnicas previstas

Para proceder al cálculo de las prestaciones que necesitarán el motor y la batería del *powertrain*, es necesario establecer el valor de algunas de las especificaciones técnicas que serán necesarias para cálculos posteriores. Unos se obtienen de forma lógica, teórica o gracias a los datos que se reflejan en la **Tabla 8.1** de alternativas de mercado.

### 10.1. Masa total del vehículo en carga

Al tratarse de un vehículo de categoría M1, éste no está sujeto a ninguna limitación de peso máximo. De todos modos, interesa tener en cuenta una masa total suficiente para que funcione correctamente pero no excesiva para no encarecer inútilmente la solución final. Cuanto más pese el VE, mayor será el gasto en materiales, mayor potencia necesitará el motor y mayores deberán ser las baterías, factores que harán que el precio final del vehículo se dispare.

Dadas las características del vehículo y comparándolo con los otros modelos anteriores, se considera una masa en vacío de 1300 kg (300 kg de baterías más 1000 kg del resto del coche). Por otro lado, la capacidad de carga es de 380 kg, resultado de la suma de la masa estándar de 75 kg de 4 personas adultas más 80 kg de equipaje.

$$m = \text{Masa total} = \text{Masa en vacío} + \text{Capacidad de carga}$$

$$m = 1300 + 380 = 1680 \text{ kg}$$

---

**Ecuación 10.1-** Masa total en carga del vehículo

Por tanto, la masa total máxima del vehículo en carga queda fijada en **1680 kg**.

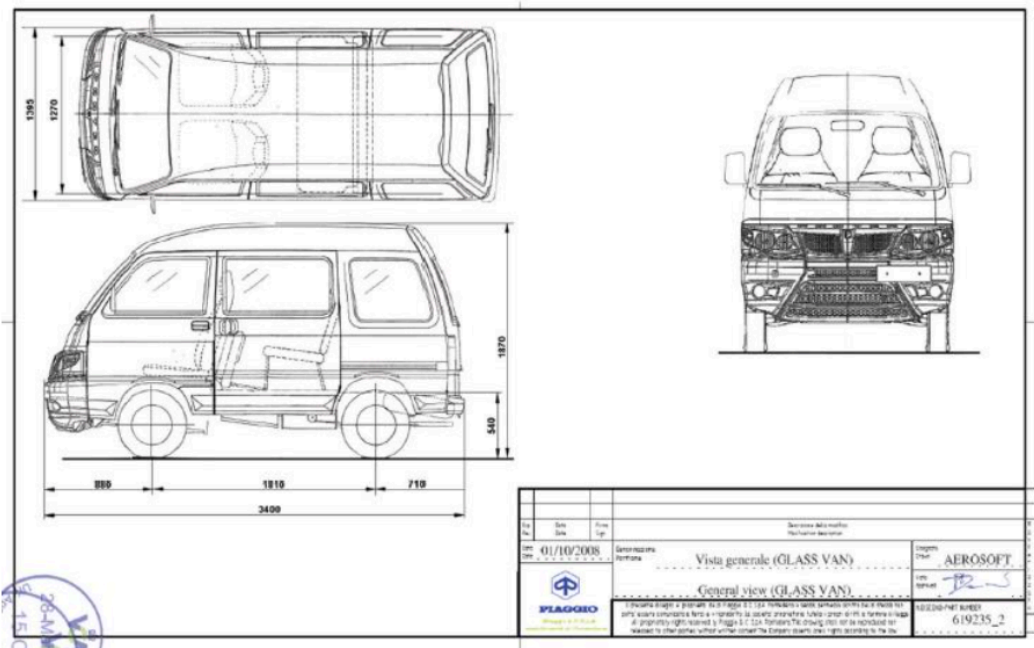
### 10.2. Velocidad máxima alcanzada

Según el reglamento general de circulación [9], la velocidad máxima permitida dentro de ciudad es de 50 km/h. Dado que el VE se diseña para que se mueva por núcleos urbanos, no es necesario sobredimensionar el motor para que sea capaz de alcanzar velocidades muy superiores, ya que supondría incrementar el precio de venta final del vehículo de manera innecesaria.

Ahora bien, se considera un margen extra de 20km/h en caso de que en situaciones puntuales se necesite mayor velocidad o se salga del centro urbano. Consecuentemente se establece la velocidad máxima en **70 km/h**.

### 10.3. Superficie frontal del chasis

Ya que el alcance del proyecto no abarca el diseño del chasis ni la estructura del VE, se debe usar cómo guía para el cálculo de la superficie frontal un vehículo existente en el mercado actual. Debido al parecido conceptual y estructural que tiene con el VE del cual se pretende diseñar el *powertrain*, se utiliza el modelo *Piaggio Porter Eléctrico* visto anteriormente para definir la altura y la anchura del coche.



**Figura 10.1-** Plano con cotas del furgón Piaggio Porter del fabricante

*Fuente: Web oficial Piaggio Commercial Vehicles*

De acuerdo con los planos oficiales, se considera una anchura de 1,395 metros y una altura de 1,870 metros.

#### 10.4. Coeficiente de penetración aerodinámica

Se designa como  $C_x$  e indica las características aerodinámicas de la carrocería del vehículo. Cuanto más bajo es el coeficiente, más aerodinámico es el coche. El coeficiente de penetración es un dato que se obtiene a través de simulación en un túnel de viento con un prototipo real o a escala y viene normalmente dado por el fabricante.

El coeficiente aerodinámico  $C_x$  debe ser inferior a 0,4 para no perjudicar de manera significativa la aerodinámica del vehículo, y en consecuencia, incrementar la fuerza de resistencia al avance del mismo. Generalmente, los valores de  $C_x$  para un coche convencional están comprendidos entre 0,3 y 0,4.

Por tanto, se define para el VE un coeficiente de penetración aerodinámico de **0,35**.

### 10.5. Autonomía

Teniendo en cuenta que el VE se diseña para circular por centros urbanos y vías de circulación especiales, se considera que la distancia media que necesita recorrer el vehículo diariamente es de 50-60 km. No obstante, y teniendo en cuenta las autonomías de las alternativas vistas, se añade un margen extra por posibles mayores distancias puntuales a cubrir.

De esta manera la autonomía máxima queda fijada en **100 km**.

### 10.6. Consumo energético de las baterías

La variabilidad en los consumos energéticos de los vehículos, expresados en Wh/km, se debe principalmente a la variabilidad en las potencias y las masas de los mismos. Para un mismo ciclo de conducción, a mayor potencia y masa del vehículo, mayor es el consumo energético que sufren las baterías. Teniendo en cuenta los distintos parámetros de consumo energético vistos en las alternativas se define un valor próximo a estos.

El consumo energético máximo que deben tener las baterías del VE queda fijado en **120 Wh/km**.

## 11. Cálculo de la potencia del motor

Para determinar la potencia necesaria que debe tener el motor eléctrico, se deben considerar todas las fuerzas que actúan sobre el VE estudiado en la dirección de movimiento. Según la Segunda Ley de Newton, la aceleración que experimenta un cuerpo de masa  $m$  es igual al sumatorio de fuerzas que actúan sobre él en la dirección del movimiento.

$$\sum F_x = m a_x$$

---

**Ecuación 11.1-** Segunda Ley de Newton

Este sumatorio de fuerzas se compone de la fuerza tractora  $F_t$ , es decir, de la fuerza del motor, y de las fuerzas de resistencia al avance.

$$\sum F_x = F_t - \text{Fuerzas resistentes}$$

---

**Ecuación 11.2-** Segunda Ley de Newton aplicada al vehículo de tracción

Por tanto, para conocer la fuerza de tracción que debe proporcionar el motor, se deben calcular las fuerzas resistentes. De esta manera se obtendrá la fuerza total que debe vencer el motor para el correcto avance del vehículo.

Para cualquier automóvil que circula en plano, estas fuerzas resistivas son la resistencia de rodadura y la resistencia aerodinámica. Si el coche además circula por una vía con pendiente ascendente, se debe tener en cuenta la resistencia a la pendiente, también conocida como resistencia gravitatoria, debida al propio peso del vehículo.

Para saber cual es la máxima fuerza que debe ser capaz de vencer el motor, se analiza el caso crítico donde estén presentes las tres fuerzas, de manera que el conjunto de fuerzas resistentes o fuerza de resistencia al avance total  $F_a$  está compuesta por la resistencia de rodadura  $F_r$ , la resistencia aerodinámica  $F_d$  y la resistencia gravitatoria  $F_g$ .

$$F_a = F_r + F_d + F_g$$

---

**Ecuación 11.3-** Fuerza de resistencia al avance total

A continuación se profundizará en el estudio de cada una de estas resistencias por separado para poder calcular la fuerza de resistencia al avance total.

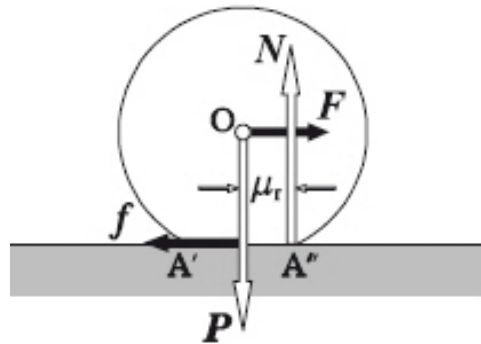
### 11.1. Resistencia a la rodadura

Esta resistencia se presenta cuando un cuerpo deformable rueda sobre una superficie. En este caso, los cuerpos deformables son las ruedas del vehículo.

Para estudiar este fenómeno, se trabaja con el diagrama del sólido correspondiente a las ruedas, separadas del resto del vehículo y de forma individual.

En cada rueda, tenemos la fuerza  $F$  de tracción proporcionada por el motor, que genera una fuerza de rozamiento  $f$  en sentido contrario y que se opone a este movimiento. La fuerza  $P$  es el peso del vehículo, y  $N$  la reacción normal.

El contacto de las ruedas con el terreno por donde circula el vehículo se realiza a lo largo de una estrecha banda  $A'A''$  debido a la deformación que sufren los neumáticos. Las reacciones en estos puntos de apoyo, originadas por el peso  $P$ , crean un par que se opone a la fuerza  $F$  de avance del motor.



**Figura 11.1-** Diagrama de fuerzas en la rueda del vehículo

Para simplificar el problema se considera que la fuerza a vencer para que el cuerpo pueda girar es la reacción normal  $N$  con su línea de acción desplazada una distancia  $\mu_r$  sobre la generatriz en  $A''$ .

Por tanto el par motor y el par de resistencia a la rodadura valen, respectivamente:

$$M_{mot} = FR$$

$$M_{rod} = N\mu_r$$

---

**Ecuación 11.4-** Par motor y par de resistencia a la rodadura

Donde  $R$  es el radio de la rueda.

Para que la rueda avance, el par aplicado debe ser mayor que el de resistencia, de manera que:

$$M_{mot} \geq M_{rod} \quad FR \geq N\mu_r$$

---

**Ecuación 11.5-** Condición de rodadura



Para vencer la rodadura, el motor debe proporcionar una fuerza  $F_r$  tal que:

$$F_r = \frac{N\mu_r}{R} = NC_r = mgC_r$$

---

**Ecuación 11.6-** Fuerza de resistencia a la rodadura

Donde  $m$  es la masa del vehículo,  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $C_r$  es el coeficiente de rodadura, que depende de parámetros tales como la rigidez de la rueda, su radio, el peso que soporta o la superficie de contacto, entre otros.

## 11.2. Resistencia aerodinámica

La resistencia aerodinámica es debida a la fuerza que sufre el vehículo al moverse a través del aire, y en particular a la componente de esa fuerza en la dirección de la velocidad relativa del cuerpo respecto del fluido y en sentido opuesto.

Esta resistencia resulta de las fuerzas de fricción del aire con la superficie del vehículo y de las fuerzas de presión sobre el vehículo. Para el caso estudiado, las fuerzas de fricción son mucho menores que las de presión y, por tanto, se pueden considerar despreciables. Así, la fuerza de resistencia aerodinámica  $F_d$  se expresa cómo:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho S C_x (v + v_a)^2$$

---

**Ecuación 11.7-** Fuerza de resistencia aerodinámica

Dónde:

- $\rho$  es la densidad del aire en  $kg/m^3$
- $S$  es la superficie frontal del vehículo en  $m^2$
- $C_x$  es el coeficiente de penetración aerodinámico
- $v$  es la velocidad relativa del vehículo respecto al suelo, en  $m/s$
- $v_a$  es la velocidad del aire respecto al suelo (del viento de cara), en  $m/s$

Se puede observar que se tiene en cuenta la velocidad relativa del vehículo respecto el fluido que atraviesa, en este caso el aire, que resulta de la suma de la velocidad del vehículo  $v$  y la velocidad del aire  $v_a$ , ambas respecto del suelo.

Tanto la superficie frontal como el coeficiente de penetración del vehículo dependen de la estructura del chasis.

El valor de coeficiente de penetración aerodinámico es el definido en el **apartado 10.4.**

Para calcular la superficie frontal  $S$ , se multiplican la altura y la anchura del coche, y el resultado se multiplica por un factor de corrección  $k$  para dar un resultado más próximo a la superficie frontal real del vehículo. Este factor es adimensional y suele tener un valor de 0,9.

$$S = altura \times anchura \times k$$

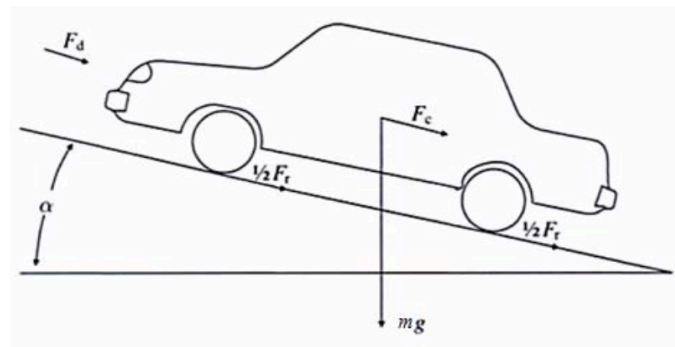
---

**Ecuación 11.8-** Superficie frontal del vehículo

Los valores de altura y anchura son los definidos en el **apartado 10.3**.

### 11.3. Resistencia al avance en pendiente (gravitatoria)

Esta resistencia aparece cuando el vehículo se mueve por un tramo de pendiente desfavorable y es consecuencia del propio peso del coche. En esta situación, el diagrama de fuerzas resistentes del vehículo es el siguiente:




---

**Figura 11.2-** Representación de las fuerzas resistentes en pendiente

Fuente: *Modern Electric Vehicle Technology* de C.C. Chan & K.T. Chau

Por tanto, la fuerza debida al peso que se opone al movimiento se expresa como:

$$F_g = mg \sin(\alpha)$$

---

**Ecuación 11.9-** Fuerza de resistencia a la pendiente

Donde  $m$  es la masa del vehículo,  $g$  es la aceleración de la gravedad y el ángulo  $\alpha$  es el de inclinación de la pendiente.

En vías y carreteras, la inclinación se suele expresar como el porcentaje de pendiente  $p$ :

$$p = \frac{h}{l} \times 100$$

---

**Ecuación 11.10-** Expresión en porcentaje de una pendiente

Donde  $h$  representa la distancia vertical recorrida y  $l$  la distancia horizontal recorrida. De esta manera se relaciona la pendiente  $p$  con el ángulo  $\alpha$ :

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{p}{100} \right)$$

---

**Ecuación 11.11-** Ángulo de inclinación de una pendiente

#### 11.4. Potencia máxima necesaria

Una vez obtenida la fuerza total que necesita realizar el motor para superar las fuerzas resistentes, se procede al cálculo de la potencia.

La potencia media es la cantidad de trabajo realizado durante un intervalo finito de tiempo. La potencia instantánea es el valor límite de la potencia media cuando el intervalo de tiempo se aproxima a cero. Por tanto, la potencia instantánea que debe ser capaz de realizar el motor eléctrico se expresa como el producto entre la fuerza calculada  $F_a$  y la velocidad del vehículo  $v$ .

$$P = \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{F \partial r}{\partial t} = F_a v$$

---

**Ecuación 11.12-** Potencia máxima necesaria

#### 11.5. Particularización y cálculos

Para realizar un cálculo fiable de la potencia del motor y hacer un dimensionamiento correcto, se debe considerar la situación más adversa posible. Es decir, la situación donde las fuerzas resistentes que se oponen al movimiento del vehículo son máximas: masa máxima del conjunto (con pasajeros y equipaje), velocidad máxima del vehículo y un tramo de carretera con pendiente desfavorable.

**Datos:**

- Densidad del aire a 20 °C y 101325 Pa = 1,205 kg/m<sup>3</sup>
- Masa máxima  $m = 1300 + 380 = 1680$  kg
- Superficie frontal  $S = 1,395 \times 1,870 \times 0,9 = 2,35$  m<sup>2</sup>
- Coeficiente de rodadura  $C_r$  de un neumático ordinario sobre asfalto = 0,03
- Velocidad máxima del vehículo  $v = 70$  km/h = 19,44 m/s
- Velocidad del aire de cara  $v_a = 10$  m/s
- Pendiente  $p$  del 5%

**Resultados:**

$$F_a = F_r + F_d + F_g = 494,42 + 429,51 + 823,01 = 1746,94 \text{ N}$$

$$P = F_a v = 1746,94 \times 19,44 = 33960,51 \text{ W}$$

Así pues, para que el vehículo pueda desplazarse a una velocidad de 70 km/h en las condiciones adversas planteadas, el motor debe suministrar como mínimo una potencia de **33960,51 W**.

## 12. Cálculo de baterías

Es una parte fundamental en el diseño del *powertrain* el correcto dimensionamiento de las baterías, que son las que proporcionarán los requerimientos energéticos necesarios para cubrir las distancias recorridas diariamente por el VE.

### 12.1. Parámetros energéticos

Es necesario determinar primeramente la capacidad energética teórica de la batería, es decir, los watts por hora que es capaz de suministrar al motor eléctrico. Este cálculo se realiza a partir del consumo energético de la batería y la distancia recorrida por el vehículo. Se considerará esta distancia recorrida cómo la autonomía que puede proporcionar el mismo.

$$\text{Capacidad energética}_t = \text{Consumo} \times \text{Autonomía}$$

---

**Ecuación 12.1-** Capacidad energética teórica de la batería

Seguidamente se debe calcular la capacidad de carga nominal teórica  $Q_t$  de la batería, en Ah, y para ello se necesita conocer previamente la tensión nominal  $V_n$  de la batería. Este valor de tensión debe adecuarse a la carga, en este caso el motor, al que suministra energía la batería. Ya que el motor eléctrico debe proporcionar una potencia de 33960,51 W, un valor de  $V_n$  apropiado para un buen funcionamiento es de 96 V. Una vez conocido este parámetro, la expresión que lo relaciona con la capacidad de carga es la siguiente.

$$Q_t = \frac{\text{Capacidad energética}_t}{V_n}$$

---

**Ecuación 12.2-** Capacidad de carga teórica de la batería

Estos valores obtenidos son teóricos, y para realizar un cálculo más preciso de las características reales de las baterías se deben tener en cuenta tres factores principales: la profundidad de descarga (DOD), la temperatura de las baterías y la Ley de Peukert.

La profundidad de descarga es el valor complementario del estado de carga de una batería (SOC), es decir, si la profundidad de carga es del 0%, el estado de descarga es del 100% y viceversa. Estos términos son importantes ya que la vida útil de las baterías se acorta si se descargan completamente. En concreto, las baterías no se deben descargar más allá de un 20% del SOC o, lo que es lo mismo, con un DOD superior al 80%. Así pues, se aplica un margen de seguridad del 20% en la capacidad de carga nominal teórica.

Por otro lado, es un hecho que las baterías funcionan mejor a temperatura ambiente, y cualquier desviación hacia los cambios calientes y fríos provoca una variación en el rendimiento y/o la longevidad de las mismas.

El funcionamiento de una batería a temperaturas elevadas mejora el rendimiento mediante la reducción de la resistencia interna y la aceleración de la velocidad de reacción química, pero tal condición acorta la vida de servicio si se permite que continúe durante un largo período de tiempo debido a que en estas condiciones, también se acelera la corrosión provocada por el electrolito.

Por el contrario temperaturas frías aumentan la resistencia interna y disminuyen la capacidad. Las baterías de ión-litio en concreto sufren una reducción en su rendimiento de tal manera que su duración se puede acortar hasta un 25%. Para contrarrestar este efecto, se aplica un margen de seguridad del 25% en la capacidad de carga nominal teórica.

La ley de Peukert expresa la variación en la capacidad de carga de las baterías a diferentes velocidades de descarga. Según esta ley, a medida que la velocidad de descarga aumenta, la capacidad de carga disponible disminuye. Sin embargo, en el caso de las baterías de ión-litio, se ha demostrado que el efecto Peukert no afecta de manera significativa en la eficiencia de la batería, de manera que no se tendrá en cuenta para los posteriores cálculos.

Teniendo en cuenta estos factores, se recalcula la capacidad de carga nominal aplicando los márgenes de seguridad comentados (el asociado al fenómeno de la DOD y el asociado a la temperatura) a través de un factor de corrección  $\beta_{corr}$ .

$$Q_{corr} = Q_t \times \beta_{corr}$$

---

**Ecuación 12.3-** Capacidad de carga de la batería corregida

Por consiguiente, la capacidad energética corregida de la batería se calculará como:

$$\text{Capacidad energética}_{corr} = V_n \times Q_{corr}$$

---

**Ecuación 12.4-** Capacidad energética de la batería corregida

## 12.2. Particularización y cálculos

### Datos:

- Consumo: 120 Wh/km
- Autonomía: 100 km
- Tensión nominal:  $V_n = 96 \text{ V}$
- Factor de corrección:  $\beta_{corr} = 1+0,2+0,25 = 1,45$

### Resultados:

$$\text{Capacidad energética}_t = \text{Consumo} \times \text{Autonomía} = 120 \frac{\text{Wh}}{\text{km}} \times 100 \text{ km} = 12000 \text{ Wh}$$

$$Q_t = \frac{\text{Capacidad energética}_t}{V_n} = \frac{12000Wh}{96 V} = 125 Ah$$

$$Q_{corr} = Q_t \times \beta_{corr} = 125 Ah \times 1,45 = 181,25 Ah$$

$$\text{Capacidad energética}_{corr} = V_n \times Q_{corr} = 96 V \times 181,25 Ah = 17400 Wh$$

Por tanto, para que el VE sea capaz de circular en las condiciones expuestas, la capacidad de carga nominal de la batería debe ser de cómo mínimo **181,25 Ah**, y su capacidad energética de **17400 Wh**.

### 13. Selección de componentes: solución final

Una vez definido qué componentes deben formar el *powertrain* y que especificaciones técnicas deben cumplir, se dispone de todas las herramientas necesarias para su búsqueda en el mercado. Es necesario hacer un estudio de diversas marcas distribuidoras para encontrar los componentes que se ajusten de mejor manera al proyecto.

Las partes del *powertrain* que se seleccionan son el motor eléctrico, el conjunto de baterías, el cargador interno, el controlador del motor y el sistema de gestión de baterías. Todos estos elementos deben cumplir las exigencias mínimas definidas en los apartados de cálculo.

#### 13.1. Motor eléctrico seleccionado

Tras realizar una búsqueda de varios distribuidores, se ha elegido HPEVS (*Hi Performance Electric Vehicle Systems*) como solución para el motor eléctrico. HPEVS es una empresa estadounidense que diseña, desarrolla y comercializa con motores de tracción trifásicos de inducción (*AC motors*) para varios vehículos e industrias. Sus sistemas se han integrado en grandes vehículos, utilitarios, vehículos de servicio, vehículos industriales, karts de golf, motocicletas e incluso en parques de atracciones. Una de las ventajas que se ha encontrado en esta compañía es que proporciona datos e información técnica en su página web de los motores que fabrican, cosa que no ocurre con muchos otros distribuidores. Además, HPEVS ofrece distintos modelos de controlador, que varían dependiendo del voltaje de la batería que se utilice en el *powertrain*, que sean compatibles con el motor que se haya escogido.

Con la potencia calculada en el **apartado 11**, se conoce que el motor debe ser capaz de suministrar un máximo de 33960,51 W. Se ha escogido, por tanto, el modelo de **motor AC12-07.51** de HPEVS, que proporciona una potencia máxima cercana a los 34 kW alimentado por un sistema de 96 V. El motor ofrece un par máximo de unos 136 N·m, una eficiencia del 88% y pesa 22,7 kg.



**Figura 13.1-** Motor eléctrico modelo AC12-07.51 de HPEVS



*Fuente: Web oficial de HPEVS*

La curva de comportamiento del AC-12 alimentado a 96 V se encuentra en el apartado de **Anexos II**, junto con los planos de las dimensiones de la estructura externa del motor.

Incluido en el paquete con este motor, HPEVS ofrece tres alternativas distintas de controlador a elección del cliente basadas en el voltaje de la batería, como también el arnés de cableado (genérico o específico basado en sus necesidades) y una placa de montaje del controlador.

### 13.2. Controlador del motor seleccionado

La alternativa que ofrece la empresa HPEVS que mejor se ajusta al motor escogido es el **controlador Curtis 1238-7601**. La marca *Curtis Instruments* trabaja paralelamente con HPEVS, y se encarga de diseñar y distribuir sistemas de instrumentación electrónica, en los que se incluyen los controladores de motor eléctrico.

El controlador Curtis 1238-7601 es capaz de funcionar en un amplio rango de tensiones de entre 72 y 130 V. Funciona con la técnica PWM y está diseñado especialmente para funcionar en coches de tamaño mediano y vehículos ligeros. Incluye la función de conversión de corriente alterna en corriente continua para el sistema de frenada regenerativa. El controlador tiene una corriente máxima de funcionamiento de hasta 650 A (con refrigeración líquida) y un voltaje de salida máximo ajustable de 96 V, de manera que es perfectamente compatible con el motor AC-12. Puede sufrir algún deterioro si supera los 80° de temperatura durante el funcionamiento. Además, es capaz de ofrecer una eficiencia del 88%. Las dimensiones del controlador son de 275x232x80 mm y pesa 5,45 kg. En **Anexos II** se muestran las conexiones, el cableado y todas las dimensiones.



**Figura 13.2-** Controlador Curtis 1238-7601

*Fuente: Web oficial de Curtis Instruments, INC.*

### 13.3. Sistema de baterías seleccionado

Las baterías de Ion-Litio resultan ser la opción con mayor número de alternativas en el mercado para VE. Después de realizar una búsqueda entre varias marcas, se ha escogido a la británica *GBS* como fabricante del sistema de baterías del *powertrain*. Esta elección se debe a la posibilidad que ofrece GBS de realizar múltiples combinaciones con sus productos para alcanzar un sistema adecuado a un precio menor que el de otros proveedores.

GBS es un fabricante de alta tecnología que se especializa en el desarrollo y fabricación de paquetes de baterías  $\text{LiFePO}_4$ . GBS posee una cubierta patentada ecológica (que reemplaza el PVDF) y crea un diseño de célula de batería escalable único. Son las fuentes de energía ideales no sólo para bicicletas eléctricas, scooters, vehículos eléctricos híbridos (HEV) y vehículos eléctricos (EV), sino también para dispositivos de almacenamiento de energía utilizados en aplicaciones de generación de energía solar y eólica.

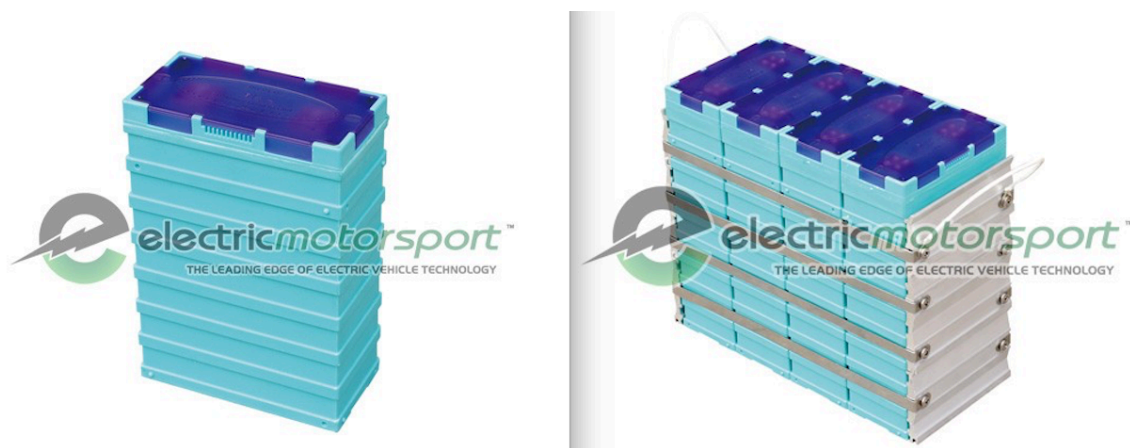
En el **apartado 12** ha quedado establecido que la tensión que alimenta las baterías debe ser de 96 V y que éstas deben tener una capacidad energética nominal mínima de 181,25 Ah. Teniendo en cuenta estos datos, se han escogido los packs de GBS de baterías de  $\text{LiFePO}_4$  de 12 V y de 100 Ah para implementar el sistema. Estos packs están formados por cuatro celdas prismáticas individuales de 3,2 V, las características de las cuales se pueden ver reflejadas en la **Tabla 13.1**.

| Parámetros de la celda individual            | Valor                                    |
|--|--|
| Tipo de batería                              | Litio-FerroFosfato ( $\text{LiFePO}_4$ ) |
| Tipo de encapsulado                          | Prismático                               |
| Capacidad nominal                            | 100 Ah                                   |
| Peso   | 3,2 kg                                   |
| Ciclo de vida                                | >1500                                    |
| DOD recomendado                              | 80%                                      |
| Ratio de auto-descarga                       | <3% mensual                              |
| <b>Voltajes</b>                              |  |
| Voltaje nominal                              | 3,2 V                                    |
| Voltaje mínimo                               | 2,8 V                                    |
| Voltaje máximo                               | 3,6 V                                    |
| <b>Corrientes</b>                            |  |
| Máxima corriente de carga                    | 3C (300 A)                               |
| Máxima corriente de descarga continua        | 3C (300 A)                               |
| Máxima corriente de descarga de pulso (<10s) | 10C (10000 A)                            |

| Temperaturas de trabajo |        |
|-------------------------|--------|
| Temperatura mínima      | -20 °C |
| Temperatura máxima      | 65 °C  |
| Dimensiones             |        |
| Longitud                | 125 mm |
| Anchura                 | 70 mm  |
| Altura                  | 234 mm |

**Tabla 13.1-** Características técnicas de una celda individual de la batería

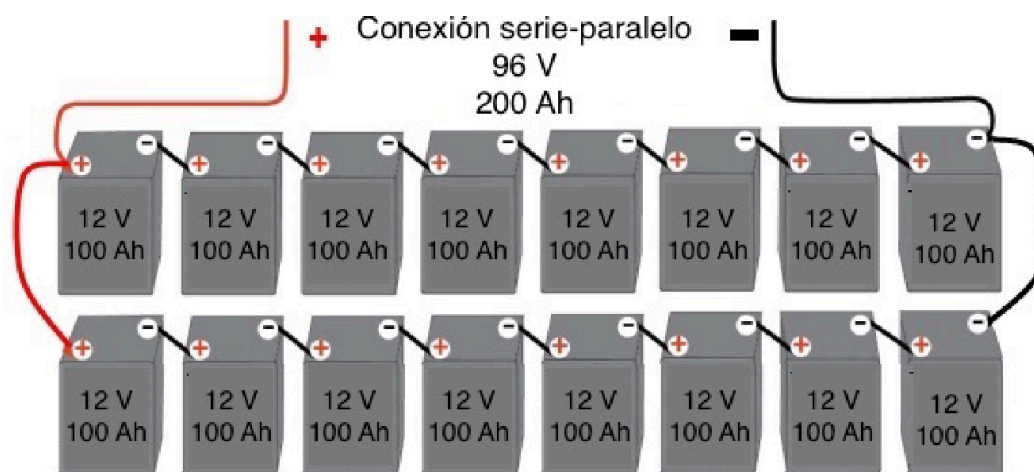
Una vez montadas las cuatro celdas, el pack de GBS de 12 V (en realidad 12,8 V nominales) tiene unas dimensiones de 125x280x234 mm y un peso de 12,8 kg. En la **Figura 13.3** se pueden observar las apariencias tanto de la celda individual cómo la del pack de 4 celdas.



**Figura 13.3-** Celda prismática individual de 3,2 V (izquierda) y pack de 4 celdas de 12,8 V (derecha), ambos con capacidad de 100 Ah

Fuente: Catálogo Electric Motor Sport, Inc. E-Commerce by Supreme Solutions

Para conseguir el montaje adecuado y así alcanzar las prestaciones necesarias, se necesitan conexas en paralelo 2 módulos, los cuales están compuestos cada uno por 8 de estos packs GBS conectados en serie. La conexión en serie de los 8 módulos de 12 V aseguran una tensión total de 96 V, y con la conexión en paralelo de 2 de estos módulos de 96 V y 100 Ah se consigue una capacidad de 200 Ah, cubriendo así las exigencias de capacidad total mínimas que requiere el sistema.



**Figura 13.4-** Sistema final de baterías seleccionado de 96 V y 200 Ah

En la **Figura 13.4** se puede ver una representación esquemática del sistema de conexiones necesario explicado anteriormente. La solución final, por tanto, consta de 16 packs de baterías de 12 V y 100 Ah. El pedido incluye los accesorios necesarios para realizar el montaje: puentes, pernos o remaches, arandelas, arandelas hendidas y cubiertas para las celdas.

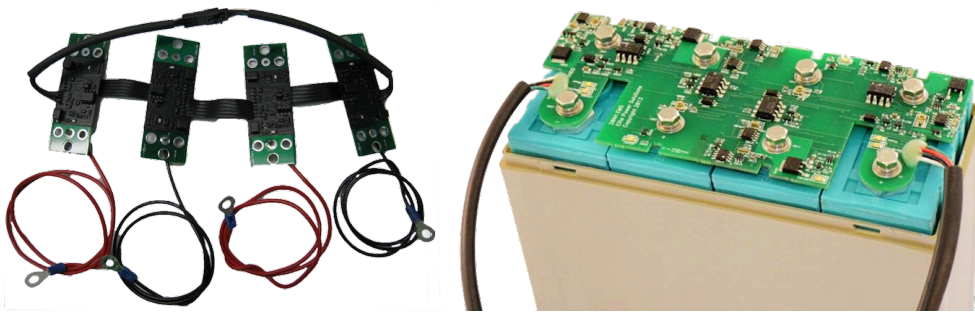
#### 13.4. BMS seleccionado

El fabricante escogido para implementar el sistema de control del conjunto de baterías diseñado es *AA Portable Power Corporation*, una empresa formada por un conjunto de fabricantes de baterías y cargadores que ofrece productos a precios muy competitivos. El sistema elegido en particular está formado por un conjunto de sensores<sup>19</sup> y actuadores<sup>20</sup> (modelo **BMS-EL-V7**), que envían la información a un kit que contiene una unidad de control electrónico o ECU (modelo **BMS-EP128**), que interpreta las señales recibidas y realiza las operaciones de control necesarias.

El BMS-EL-V7 es una cadena de cuatro sensores/actuadores conectados en serie. Cada uno de los tableros de sensores debe ser montado en la parte superior de cada una de las celdas de LiFePO<sub>4</sub> que forman los packs de 12 V y 100 Ah, para que de esta manera midan el voltaje y la temperatura de estas celdas. Es decir, una cadena de sensores por pack de baterías, que hacen un total de 16, tal y como se muestra en la **Figura 13.5**. La función de equilibrado de la célula está incorporada. Los resultados de voltaje y temperatura se suministran a la unidad de la computadora de la ECU a través de la conexión en cadena. El BMS-EL-V7 admite packs de células desde 20 Ah hasta los de 200 Ah, de manera que las baterías se encuentran dentro del rango permitido.

<sup>19</sup> Sensor: dispositivo que detecta magnitudes físicas o químicas y las transforma en variables eléctricas.

<sup>20</sup> Actuador: dispositivo que convierte una señal eléctrica en una señal de magnitud física distinta.



**Figura 13.5-** Cadena de sensores BMS-EL-V7 (izquierda) y montaje sobre un pack de 12 V y 100 Ah (derecha)

*Fuente: Ficha técnica oficial de AA Portable Power Corp*

Una vez recogidas las medidas de los sensores, estas son llevadas al ECU (*Electric Control Unit*). Concretamente, el modelo BMS-EP128 es un kit que contiene un módulo controlador, una pantalla LCD para mostrar los datos, un shunt<sup>21</sup> de medida de corriente y protección, un interruptor momentáneo, un relé<sup>22</sup> de protección y el cableado necesario para realizar las conexiones. El conjunto se muestra en la **Figura 13.6**.



**Figura 13.6-** Kit BMS-EP128 de AA Portable Power Corporation

*Fuente: Ficha técnica oficial de AA Portable Power Corp*

---

<sup>21</sup> Shunt: resistencia conocida utilizada para determinar la intensidad de corriente eléctrica que fluye a través de una carga.

<sup>22</sup> Relé: Dispositivo electromagnético que, estimulado por una corriente eléctrica muy débil, abre o cierra un circuito en el cual se disipa una potencia mayor.

El módulo controlador o ECU (en la **Figura 13.6**, arriba a la derecha) se encarga de realizar las siguientes operaciones:

- Comunicar con cada sensor esclavo para la supervisión de la tensión máxima y mínima, la corriente máxima y mínima y la temperatura, para realizar la función de equilibrado en cada celda.
- Proporcionar todos los datos necesarios para mostrar en la pantalla LCD.
- Proporcionar la conexión al shunt para medir la corriente.
- Controlar la conexión del interruptor momentáneo para cambiar la información que está siendo exhibida en la pantalla LCD.
- Proporcionar una señal para abrir el relé de descarga, el relé de carga (si no se utiliza con un cargador bus CAN<sup>23</sup>) para proteger la batería de sobrecarga, descarga o alta temperatura.
- Proporcionar la conexión a un cargador de bus CAN (sin relé de carga necesario).

La pantalla LCD, por su parte, muestra la tensión, la corriente y la capacidad de la batería. La salida de vídeo es a color, NTSC. Las dimensiones del shunt son de 83x45x45 mm.

Las características técnicas del BMS, proporcionadas por el fabricante, se muestran en la **Tabla 13.2**.

| Parámetro del BMS                      | Valor                     |
|--|---------------------------|
| Rango de tensiones del ECU             | De 8 a 20V                |
| Intensidad nominal del ECU             | 120mA                     |
| Voltaje de la batería                  | Hasta 500V                |
| Número de celdas admitidas             | Hasta 140                 |
| Resolución de voltaje                  | 0,1V                      |
| Resolución de intensidad <sup>24</sup> | 1A                        |
| Rango de temperatura                   | De -146°C a +92°C         |
| Precisión de la medida <sup>25</sup>   | <1% de la escala completa |

<sup>23</sup> CAN: protocolo de comunicaciones basado en una topología bus para la transmisión de mensajes en entornos distribuidos.

<sup>24</sup> Resolución: menor cambio en la magnitud de entrada que se aprecia en la magnitud de salida.

<sup>25</sup> Precisión: máximo error esperado en la medida.

|  |   |
|--|---|
| Velocidad de medición                      | 3 veces por segundo en pantalla principal |
| Rango de tensiones de las células          | de 2,00 a 4,50V                           |
| Tensión de equilibrado <sup>26</sup>       | 3,55V                                     |
| Retardo de salida (predeterminado)         | 30 segundos                               |
| Detección de fallos a tierra <sup>27</sup> | 2mA (5000 Ohm/Volt)                       |
| Tamaño del ECU                             | 145x66x46 mm                              |

**Tabla 13.2-** Especificaciones técnicas del sistema de control de baterías modelo BMS-EP128

### 13.5. Cargador interior seleccionado

Para el cargador interior el fabricante finalmente escogido es ElCon (*Electric Conversions*), empresa estadounidense con más de 25 años de experiencia en convertidores eléctricos de alta frecuencia y con múltiples productos de máxima calidad, fiabilidad y eficiencia. El modelo en cuestión es el **PFC1500-TCCH-9612** (**Figura 13.7**), que funciona de forma óptima con un voltaje de entrada AC de 220 V y frecuencia del orden de los 50/60 Hz para entregar a las baterías una corriente DC de voltaje 96 V.



**Figura 13.7-** Cargador eléctrico modelo PFC1500-TCCH-9612

Fuente: Ficha técnica oficial del PFC1500 de Electric Convector.

<sup>26</sup> Tensión de equilibrado: valor de voltaje al que se ajustan las celdas en el proceso de equilibrado.

<sup>27</sup> Fallo a tierra: se produce cuando existe un nivel de aislamiento entre el chasis y el suelo por debajo del mínimo aceptado.



Todas las especificaciones técnicas de este cargador, proporcionadas por la empresa ElCon, se resumen en la **Tabla 13.3**.

| Parámetro del cargador               | Valor                 |
|--------------------------------------|-----------------------|
| Rango de voltaje de entrada AC       | De 85 V a 265 V       |
| Frecuencia de entrada AC             | De 45 Hz a 65 Hz      |
| Tensión nominal de salida            | 96 V                  |
| Tensión máxima de salida             | 136 V                 |
| Corriente máxima de salida           | 12 A                  |
| Factor de potencia AC                | ≥0,98                 |
| Eficiencia de carga completa         | ≥93%                  |
| Grado de protección IP <sup>28</sup> | IP65                  |
| Temperatura de funcionamiento        | De -40 °C a 55 °C     |
| Temperatura de almacenamiento        | De -40 °C a 100 °C    |
| Dimensiones                          | 352mm × 175mm × 139mm |
| Peso neto                            | 6.33kg                |

**Tabla 13.3-** Especificaciones técnicas del cargador modelo PFC1500

<sup>28</sup> Grado de protección IP: hace referencia a la norma internacional [CEI 60529 Degrees of Protection](#), que especifica un efectivo sistema para clasificar los diferentes grados de protección aportados por los contenedores que resguardan los componentes que constituyen el equipo. Cuando mayor es el grado de protección IP, más protegido está el equipamiento.



## 14. Estudio de costes

En un proyecto de estas características, es importante definir el coste que supone el llevarlo a cabo, para poder dar una idea a cualquier entidad que esté interesada en implementarlo o en solicitarlo del precio aproximado que se deberá pagar por él. El coste total de un proyecto tecnológico tiene en cuenta muchos factores, y no todos dependen propiamente del equipo técnico, como la gestión o la comercialización de los productos diseñados. A continuación, se tendrán en cuenta los factores que si están en el alcance del diseño, que son los costes de los componentes y la remuneración que se deberá pagar al trabajador (en este caso, al ingeniero) que se encargue de desarrollar el proyecto.

### 14.1. Precios de los componentes

En este apartado solo se analizarán los costes individuales de cada uno de los elementos que forman el *powertrain* según los modelos escogidos en los apartados anteriores. Hay que tener presente que el precio final real que supone montar e instalar el *powertrain* diseñado en el vehículo eléctrico incluye el coste de una serie de procesos y operaciones adicionales. Estos costes asociados aparte del de los propios componentes no se tienen en cuenta para el siguiente estudio.

A continuación (**Tabla 14.1**), se representan los precios de los componentes elegidos para el diseño y el cálculo del coste total resultado de la suma de todos ellos.

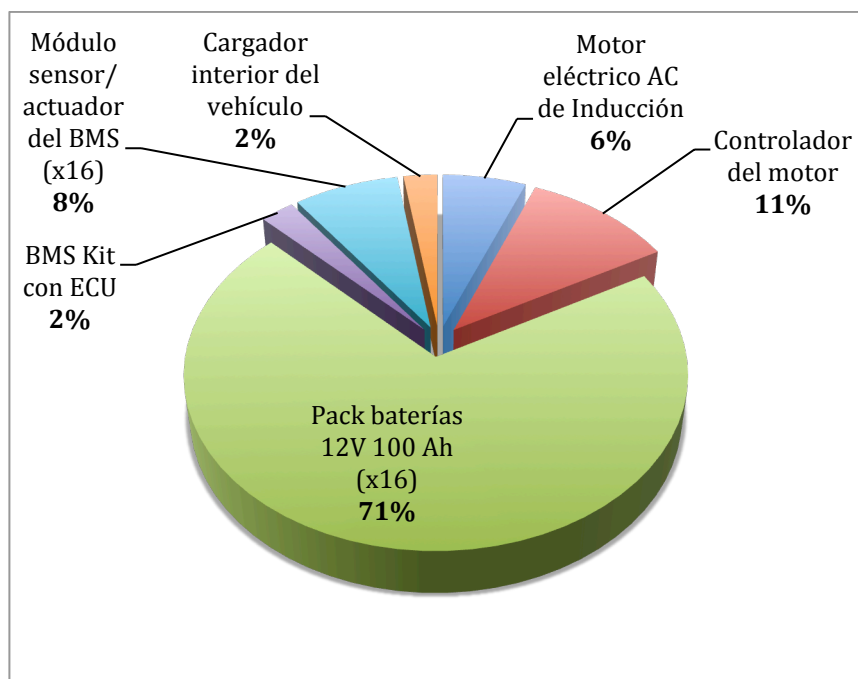
| Componente                      | Precio por unidad (€) | Unidades | Precio (€)      |
|---------------------------------|-----------------------|----------|-----------------|
| Motor eléctrico AC de Inducción | 750,19                | 1        | 750,19          |
| Controlador del motor           | 1354,70               | 1        | 1354,70         |
| Pack baterías 12V 100 Ah        | 550,86                | 16       | 8813,76         |
| BMS Kit con ECU                 | 309,02                | 1        | 309,02          |
| Módulo sensor/actuador del BMS  | 59,12                 | 16       | 945,92          |
| Cargador interior del vehículo  | 304,54                | 1        | 304,54          |
| <b>TOTAL</b>                    |                       |          | <b>12478,13</b> |

**Tabla 14.1-** Precios de los componentes y coste total del *powertrain*

Por tanto, el precio total de la solución escogida es de **12.478,13 euros**.

Conviene destacar que los precios que se muestran en la **Tabla 14.1** corresponden a los precios proporcionados por distintos proveedores en sus páginas web para la adquisición de una unidad de producto. En caso de hacer un pedido de múltiples unidades, el precio total de cada uno de los componentes, como es lógico, resultaría menor. En cualquier caso, los proveedores no comparten públicamente los precios derivados de un pedido en lotes, de manera que estos precios son desconocidos.

Para comprender de mejor manera el gasto que supone cada uno de los componentes respecto al precio total del *powertrain*, la **Figura 14.1** muestra un desglose de los precios componente a componente. El peso que tiene cada uno se ve reflejado en tanto por ciento respecto del total.



**Figura 14.1-** Desglose de costes de los componentes

Se puede observar que la distribución de costes de los distintos componentes es muy desigual. De esta forma es fácil detectar que el sistema de baterías corresponde al componente más caro del conjunto, ya que tan sólo él representa el 71% del precio total. Esto se debe a que el almacenamiento energético es una tecnología poco madura y con gran margen de mejora. En los próximos años se espera una importante evolución en los sistemas de baterías, que desembocará en una disminución considerable de los precios. Por todo lo demás, los otros costes están repartidos de forma relativamente equitativa.

## 14.2. Remuneración del proyecto

Para conocer el precio que se deberá pagar al ingeniero que lleve a cabo todo el proceso de diseño del *powertrain*, se deben establecer varios parámetros previamente. En primer lugar, la remuneración que se le deberá pagar por hora trabajada. Para este proyecto, se ha establecido un sueldo de 30 €/hora. En segundo lugar, se deben especificar las horas empleadas en realizar cada una de las actividades que requiere el trabajo, de forma más o menos resumida, para conocer las labores por las que se le está pagando al ingeniero y el tiempo que le dedica a cada una. Además, se deben añadir las tareas posteriores necesarias para acabar el diseño completamente y poder garantizar una solución real, así como una estimación de las horas requeridas para conseguirlo.

En la **Tabla 14.2** se desglosan todas las tareas comentadas:

| Actividades                                       | Salario (€/h) | Horas trabajadas | Remuneración (€) |
|---|---------------|------------------|------------------|
| <b>Actividades realizadas</b>                     |               |                  |                  |
| Planteamiento problemática y análisis de factores | 30            | 15               | 450              |
| Definición del alcance y objetivos                | 30            | 10               | 300              |
| Búsqueda de información y estudio de componentes  | 30            | 30               | 900              |
| Estudio mercado                                   | 30            | 30               | 900              |
| Definición de parámetros                          | 30            | 30               | 900              |
| Diseño conceptual                                 | 30            | 20               | 600              |
| Cálculo de prestaciones                           | 30            | 50               | 1500             |
| Búsqueda de componentes                           | 30            | 70               | 2100             |
| Estudio de costes                                 | 30            | 10               | 300              |
| Estudio medioambiental y de normativa             | 30            | 15               | 450              |
| Planificación                                     | 30            | 10               | 300              |
| Redacción   | 30            | 90               | 2700             |
| <b>Acumulado</b>                                  |               | 380              | 11400            |

| <b>Actividades posteriores</b>          |    |     |              |
|---|----|-----|--------------|
| Gestión de componentes                  | 30 | 50  | 1500         |
| Plan de trabajo                         | 30 | 50  | 1500         |
| Periodo de pruebas                      | 30 | 200 | 6000         |
| Evaluación y modificaciones posteriores | 30 | 100 | 3000         |
| <b>Acumulado</b>                        |    | 400 | 12000        |
| <b>TOTAL</b>                            |    | 780 | <b>23400</b> |

***Tabla 14.2-** Desglose de actividades y remuneración*

El conjunto de actividades posteriores está formado por algunos de los procesos más importantes que se deben realizar después del proyecto académico para intentar llevar del diseño expuesto al mercado y al mundo real. La gestión de componentes corresponde a la puesta en contacto con los proveedores y la compra de los productos necesarios. El plan de trabajo consiste en organizar todos los procesos a realizar con los componentes (montaje, ensayos, pruebas...). El periodo de pruebas abarca todas las que se realicen desde el primer diseño hasta el diseño final. La evaluación y modificaciones se llevan a cabo paralelamente con las pruebas, según los resultados que éstas proporcionen.

Como se puede observar, para llegar a una solución fiable que pueda trasladarse al mercado, deben realizarse una serie actividades que tienen una duración considerable. Teniendo en cuenta tanto las tareas que se han llevado a cabo en el proyecto académico como las que quedan por hacer, el precio total relativo a la remuneración del proyecto aproximado puede ser de unos **23.400 euros**.

## 15. Planificación del proyecto y programación

Tal y como se ha explicado en el **apartado 6**, el alcance del proyecto académico solo incluye el estudio y diseño del *powertrain* del vehículo eléctrico, además de la selección de los componentes, existentes en el mercado, necesarios para implementarlo. De todas formas, no tendría sentido no establecer una planificación de todas las etapas necesarias para que el diseño planteado llegue a comercializarse, como un producto final implementado en vehículos modulares que dan solución a la problemática planteada en primer lugar.

La planificación de todo el proyecto, por tanto, abarca desde el estudio realizado en este trabajo hasta la comercialización de los vehículos eléctricos finales, y sigue un orden lógico y coherente en cada una de sus etapas.

La fase inicial del proyecto consiste en un planteamiento de la problemática y en un análisis de los factores que la provocan. Una vez realizados, se debe marcar el objetivo que se desea cumplir una vez acabado todo el proceso definiendo en qué consistirá la solución final. En esta primera fase se deben dejar muy claros tanto el propósito del proyecto como el alcance que tiene.

*Duración de esta fase: 4 semanas*

La segunda fase consiste en la búsqueda de información y en el estudio de los componentes que se analizarán durante el proyecto. Hay que tener en cuenta que el *powertrain* estudiado representa solamente uno de los conjuntos que conforman el sistema final, es decir, el vehículo solución. Esta fase también incluye la realización de un estudio de mercado. A partir de ese momento se plantean las primeras alternativas, teniendo en cuenta su viabilidad tecnológica, económica y ambiental.

*Duración de esta fase: 12 semanas*

En la tercera fase se particulariza más el proyecto y se continuarán planteando alternativas, hasta explorar todas las soluciones posibles. Una vez vistas todas las alternativas, se decide el sistema solución final, que debe cumplir con las especificaciones y características técnicas que se han estudiado. También se revisa la normativa que se aplica al proyecto para que cumpla todos los requisitos necesarios.

*Duración de esta fase: 5 semanas*

En la cuarta fase se crea un equipo de gestión que establecerá el plan de trabajo, el personal y las instalaciones necesarias para convertir la solución teórica en una realidad. De esta forma se distribuyen las funciones y responsabilidades de cada grupo de trabajadores. También se crea un equipo comercial que se debe poner en contacto con los proveedores de componentes y con futuros clientes potenciales.

*Duración de esta fase: 10 semanas*

La quinta fase se dedica a la producción de las primeras unidades de productos a la vez que se da formación al personal de producción. Se analiza el sistema de gestión y se realizan los cambios y modificaciones pertinentes si se detectan errores.

*Duración de esta fase: 6 semanas*

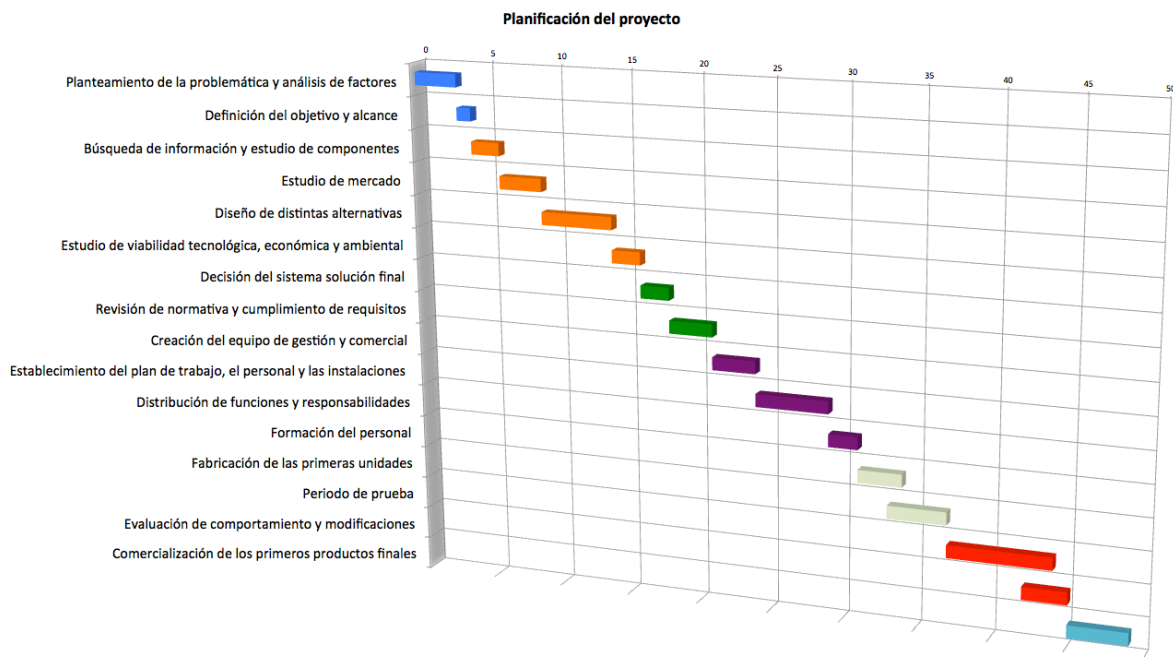
En la sexta fase se inicia un período de prueba, donde se realizan ensayos de verificación técnica y de seguridad de los vehículos finales. Se llevan a cabo los estudios de comportamiento fuera de la planta de producción y se evalúan los resultados. Si existe cualquier fallo o deficiencia en el producto final, de nuevo se hacen las modificaciones pertinentes, como en la fase anterior.

*Duración de esta fase: 8 semanas*

La séptima y última fase consiste en la comercialización y la salida al mercado de los primeros productos. Durante esta última etapa también se recogerá y analizará el *feedback* de los usuarios, para que se puedan realizar mejoras a corto y medio plazo en el producto e iniciar nuevos proyectos futuros.

*Duración de esta fase: 4 semanas*

Para visualizar de forma esquemática todo el proceso, se facilita el diagrama de Gantt siguiente, que representa la planificación del proyecto ordenado cronológicamente y dividido en todas sus etapas. Las etapas que pertenecen a una misma fase están representadas con el mismo color. La duración de estas etapas se expresa en semanas.



**Figura 15.1-** Diagrama de Gantt del proyecto

La duración total del proyecto será, por tanto, de **49 semanas**.

## 16. Impacto medioambiental

En todo proyecto tecnológico es importante tener en cuenta la repercusión medioambiental que tiene el sistema estudiado sobre el entorno. Por lo que respecta al vehículo eléctrico, es interesante estudiar cuáles son los elementos que influyen de manera más significativa en el medio ambiente, por un lado, y el proceso de reciclaje de las baterías, por otro.

### 16.1. Factores determinantes en la huella ambiental del VE

El tamaño de la huella ambiental que provoca un vehículo convencional depende en gran medida de las fuentes de energía que se utilizan como combustible para su funcionamiento. Siguiendo este criterio, se podría llegar a pensar erróneamente que, en el caso concreto del vehículo eléctrico, este impacto medioambiental viene definido por el sistema de baterías que lleva incorporado.

Un estudio realizado por el centro de investigación suizo Empa [10] desmiente esta afirmación, y proporciona con su trabajo un importante avance en el estudio comparativo de la huella ambiental producida por un vehículo de combustión y un VE y en los factores que determinan el impacto medioambiental que produce un vehículo que funciona con energía eléctrica.

El estudio demuestra, cómo era de esperar, que los coches eléctricos que emplean baterías de ion-litio presentan una carga ambiental mucho menor con respecto a los que se propulsan de manera convencional. En concreto, un coche de gasolina de prestaciones medias debería consumir entre 3 y 4 litros de combustible cada 100 kilómetros para ser igual de “eco-friendly” que un coche eléctrico de características similares y alimentado con baterías de ion-litio recargadas en una red eléctrica europea típica. Teniendo en cuenta que los mejores promedios registrados por los coches convencionales durante el estudio fueron de 5,2 litros de combustible cada 100 kilómetros, es obvio que los VE representan una solución mucho más ecológica.

Asimismo, un 15 por ciento como máximo de la carga medioambiental total de los vehículos eléctricos se puede atribuir a las baterías, teniendo en cuenta su fabricación, mantenimiento y eliminación. La mitad de esta cifra, es decir, alrededor de un 7,5 por ciento de la carga ambiental total, se produce durante el refinado y la fabricación de las materias primas empleadas posteriormente en la batería, como por ejemplo el cobre y el aluminio. Mientras tanto, la producción del litio utilizado es responsable de solamente el 2,3 por ciento del impacto ambiental total. Por tanto, las baterías suponen solo una pequeña parte del daño ecológico producido por un coche eléctrico.

El estudio llega a la conclusión de que el mayor impacto ambiental causado por el VE viene provocado por la recarga eléctrica que requiere el sistema de baterías. Esto se debe a que en Europa, por norma general, la electricidad necesaria para cargar el vehículo eléctrico proviene de una mezcla de plantas atómicas, térmicas de carbón e hidroeléctricas donde se generan tres veces más contaminación que al

utilizar otras opciones energéticas. Si, por ejemplo, la electricidad se genera exclusivamente por centrales térmicas de carbón, el impacto ecológico se incrementa en un 13 por ciento. Cuando la fuente es puramente hidroeléctrica, por el contrario, la huella ecológica disminuye en un mínimo del 40 por ciento. Por tanto, la conclusión es que vale la pena la investigación en fuentes de energía alternativas y más respetuosas con el medio ambiente.

## **16.2. Reciclaje de baterías**

En cuanto al reciclaje de las baterías, éste depende de la composición química de las mismas. La gran ventaja en el reciclado de las baterías de ion-Litio es que muchos de sus componentes principales son prácticamente 100% reciclables. Es el caso del litio, el cobre, el aluminio, el hierro, el carbono o el PP (polipropileno).

En el caso de este tipo de baterías, los procesos de reciclado se dividen en dos tipos: los procesos piro-metalúrgicos, donde los metales se recuperan mediante hornos a alta temperatura, y los procesos hidro-metalúrgicos, donde los metales se recuperan por métodos químicos acuosos. La principal diferencia de ambos modelos es el objetivo de los mismos: mientras el piro-metalúrgico tiene como objetivo recuperar metales valiosos (como el Cobalto y el Níquel), el hidro-metalúrgico tiene como objetivo recuperar Litio.



## 17. Normativa aplicable

Dado que el *powertrain* diseñado está destinado a implementarse finalmente en un vehículo eléctrico, es imprescindible tener en cuenta la normativa de seguridad y homologación que deberá cumplir. Esta legislación, definida internacionalmente, se especifica en el Reglamento número 100 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE/ONU)[11], que recoge las disposiciones uniformes relativas a la homologación de vehículos en relación con los requisitos específicos del grupo motopropulsor eléctrico. Este documento se publicó el 31 de marzo de 2015 en el Diario Oficial de la Unión Europea, donde puede ser consultado de manera íntegra (se encuentra referenciado en la bibliografía).

En este apartado se reflejan los aspectos del reglamento que se consideran más importantes para este proyecto, que se incluyen en los apartados 5 y 6, donde se explican los requisitos de un vehículo por lo que respecta a su seguridad eléctrica y los requisitos de un sistema de acumulación de energía recargable (REESS) por lo que se refiere a su seguridad, respectivamente.

Según el apartado 5.1 de protección contra choques eléctricos:

“Estos requisitos en materia de seguridad eléctrica se aplican a los buses de alta tensión en caso de que no estén conectados a fuentes de alta tensión externas.”

Apartado 5.1.1:

“[...]La protección contra el contacto directo con las partes activas deberá cumplir los apartados 5.1.1.1 y 5.1.1.2. Estas protecciones (aislante sólido, barrera, envolvente, etc.) no deberán poder abrirse, desmontarse o quitarse sin el uso de herramientas.”

Apartado 5.1.1.1:

“A efectos de la protección de las partes activas dentro del habitáculo para ocupantes o del compartimento para equipaje, se proporcionará el grado de protección IPXXD.”

Apartado 5.1.1.2:

“A efectos de la protección de las partes activas en zonas distintas del habitáculo para ocupantes o del compartimento para equipaje, se cumplirá el grado de protección IPXXB.”

De esta forma, se debe proporcionar un grado de protección de estos elementos con IPXXD, si se encuentran dentro del habitáculo para ocupantes o del compartimento para equipaje, o con IPXXB si se encuentran en otras zonas. Estos requisitos deben ser cumplidos también por los conectores, que se especifican en el Apartado 5.1.1.3.

Según el Apartado 5.1.2 de protección contra el contacto directo:

“Los vehículos equipados con cualquier tipo de REESS homologado de conformidad con la parte II del presente Reglamento deberán estar también protegidos contra el contacto indirecto.”

Apartado 5.1.2.1:

“A efectos de la protección contra los choques eléctricos que puedan producirse por contacto indirecto, las partes conductoras expuestas, como las barreras y las envolventes conductoras, estarán conectadas galvánicamente de forma segura al chasis eléctrico a través de una conexión con cables eléctricos o un cable de tierra, o bien mediante soldadura, tornillos, etc., de manera que se eviten situaciones de peligro.”

Dentro el apartado 5.1.2. también se especifica la protección necesaria durante la conexión del vehículo a fuentes de energía eléctrica mediante la conexión a tierra.

El apartado 5.1.3 determina las resistencias de aislamiento que deben tener los circuitos eléctricos conectados al chasis según el tipo de grupo motopropulsor eléctrico del que disponga el vehículo.

Según el Apartado 5.3 de seguridad funcional:

“Se dará al conductor al menos una indicación momentánea cuando el vehículo esté en «modo de conducción posible activo».”

“[...] Al salir del vehículo, una señal (óptica o acústica) avisará al conductor en caso de que el vehículo siga estando en el modo de conducción posible activo.

En caso de que el usuario pueda cargar desde el exterior el REESS de a bordo, deberá ser imposible que el vehículo se desplace por su propio sistema de propulsión mientras el conector de la fuente de energía eléctrica exterior esté conectado físicamente a la toma del vehículo.[...]”

Este último fragmento hace que resulte necesario disponer de un sistema de control que impida el funcionamiento del motor eléctrico durante el proceso de carga de la batería.

En el Apartado 6 de requisitos de seguridad que debe cumplir el sistema REESS del vehículo se explica que, se aplicarán los procedimientos prescritos en el anexo 8 del reglamento y se definen los diferentes tipos de ensayos a realizar con sus correspondientes criterios de aceptación.

Estos ensayos son de vibración, de choque térmico y de ciclos, de impacto mecánico, de resistencia al fuego, de protección frente a cortocircuitos exteriores, de protección de sobrecarga, de protección contra la descarga excesiva, de protección contra sobrecalentamiento y de emisión de gases (apartados 6.2 al 6.10, respectivamente).

## Conclusiones

Al principio de este proyecto se han planteado una serie de problemáticas relacionadas con la superpoblación de vehículos privados en las ciudades, que afectan a sus habitantes de forma directa y claramente negativa. El empeoramiento de esta situación en los últimos años y la idea de intentar liberar los centros urbanos del excesivo tráfico, del ruido y de la contaminación, han sido los factores principales que han impulsado la realización este trabajo.

Cuando se ha analizado en profundidad cuáles son los causantes de este fenómeno, se ha llegado a la conclusión de que los automóviles convencionales de transporte privado se usan de una manera poco eficiente y desmesurada, a lo que se le añade que, en el mercado automovilístico actual, no existe una alternativa que se adapte a una correcta circulación a través del centro de la ciudad o por zonas especiales o reservadas.

El concepto propuesto de diseñar un *powertrain* destinado a un vehículo eléctrico de características muy concretas ha resultado ser muy interesante por varios factores. Primero, por el hecho de pensar en un vehículo que pueda funcionar como taxi o como transporte de equipaje, y del que se aproveche toda su capacidad cuando se ponga en circulación. Segundo, por el proceso de optimizar el tipo de motor, que no necesita ser demasiado potente para circular por vías de velocidad reducida, con el consiguiente ahorro económico y energético que eso conlleva. Y por último, por trabajar con un sistema totalmente eléctrico y con cero emisiones perjudiciales para el medio ambiente, que como se ha visto, puede ser hasta indispensable en un futuro si se quiere circular por algunas ciudades.

El resultado de este diseño ha resultado ser satisfactorio, ya que se ha dado con una solución que cumple con todas las prestaciones y requisitos que se han planteado al inicio del proyecto y a un precio económico más que aceptable. El siguiente paso a realizar en futuros desarrollos consistirá en implementar el *powertrain* diseñado en un vehículo modular, cuyas características principales deberán ser iguales o parecidas a las que se especifican a lo largo de este trabajo.

Anexos

Anexo I. Alternativas estudiadas



Ilustración 1- Piaggio Porter eléctrico furgón acristalado

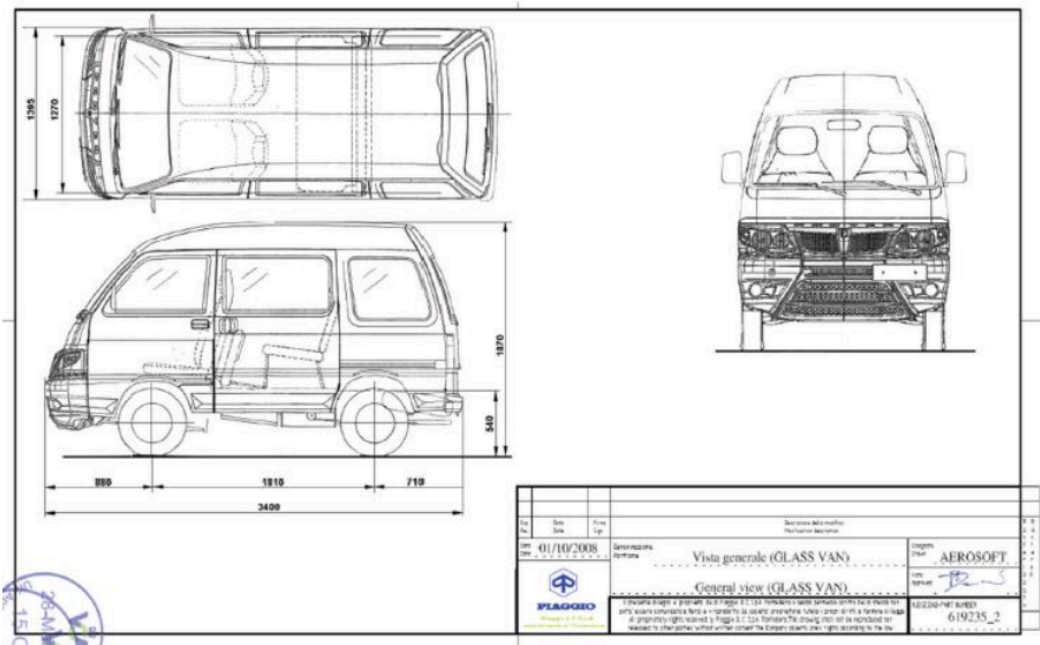


Ilustración 2- Dimensiones chasis Porter eléctrico furgón acristalado



*Ilustración 3- Mahindra e2o*

---



*Ilustración 4- Mitsubishi i-MiEV*

---



Ilustración 5- Citroën C-Zero



Ilustración 6- Dimensiones chasis Citroën C-Zero





*Ilustración 7- Peugeot i-On*



*Ilustración 8- Dimensiones chasis Peugeot i-On*

Anexos II. Componentes seleccionados

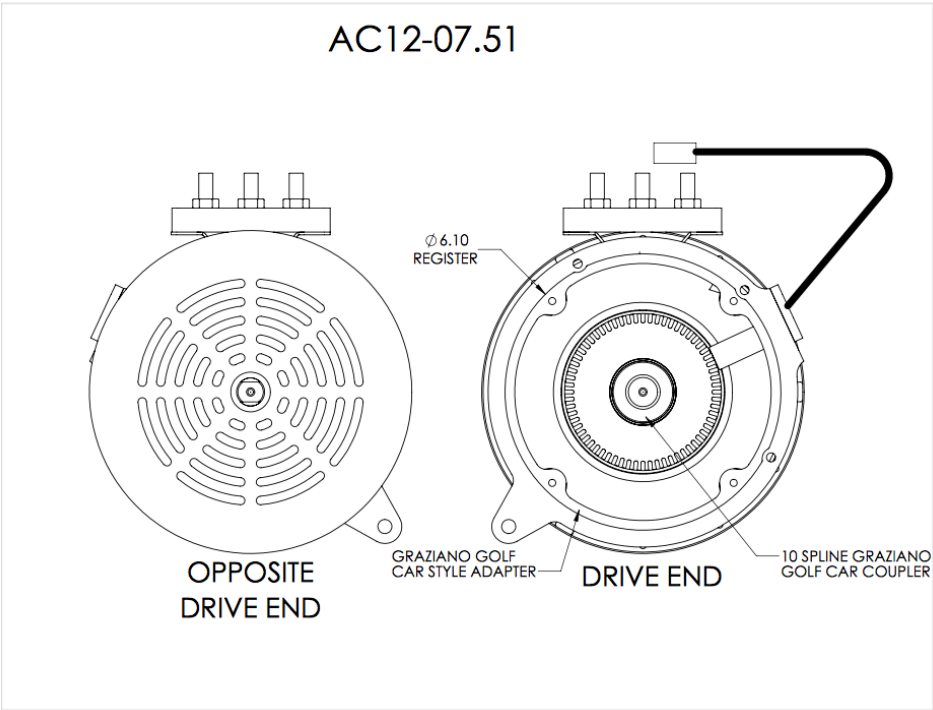


Ilustración 9- Plano frontal motor AC-12

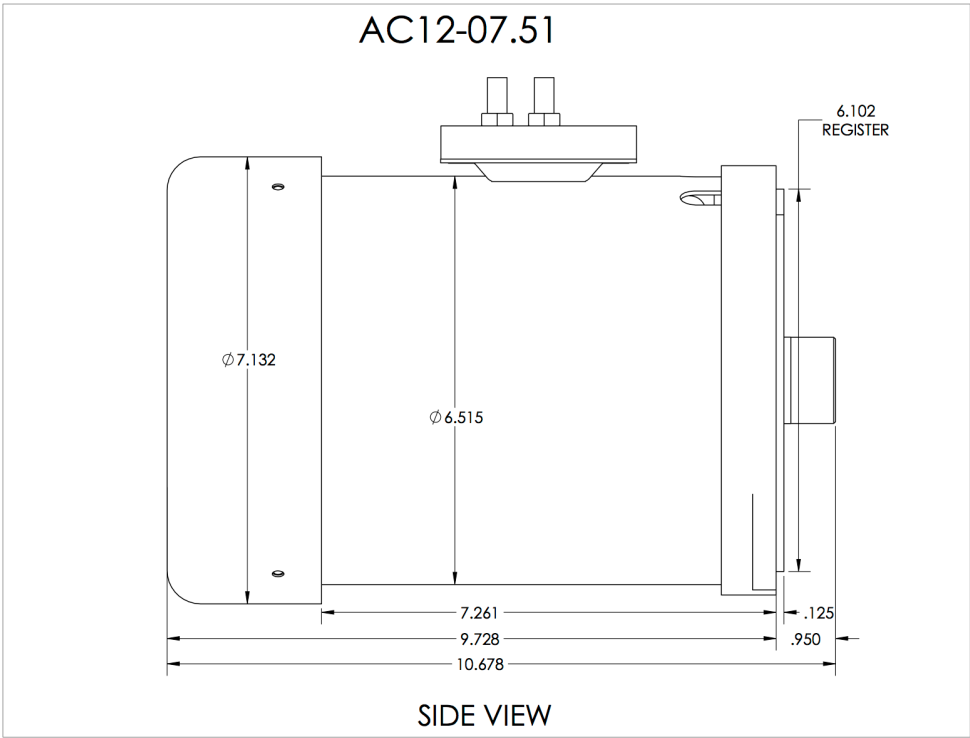
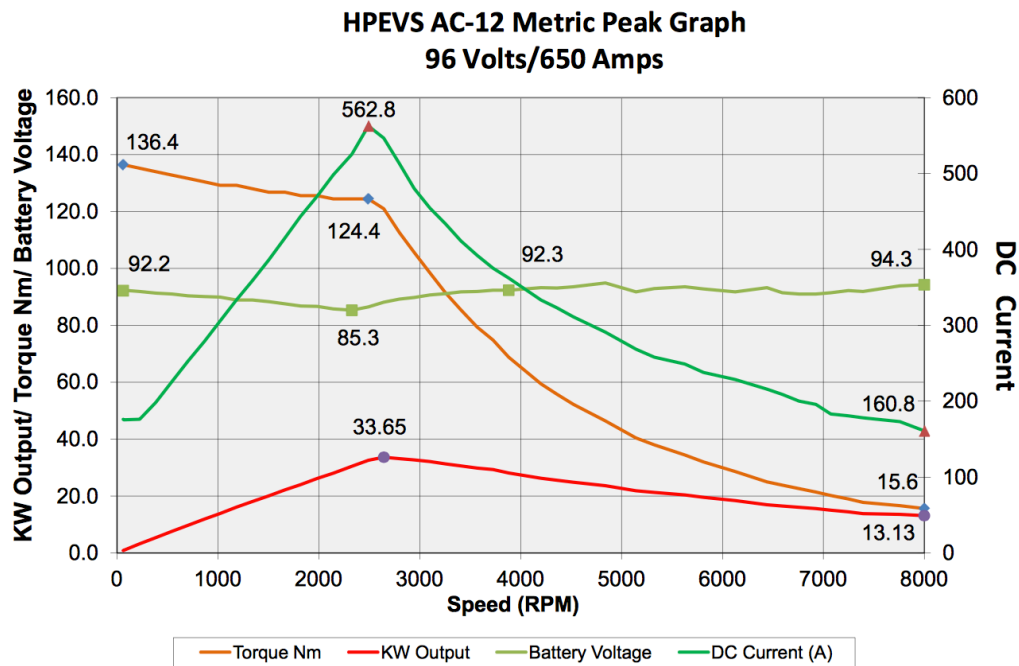


Ilustración 10- Plano lateral motor AC-12

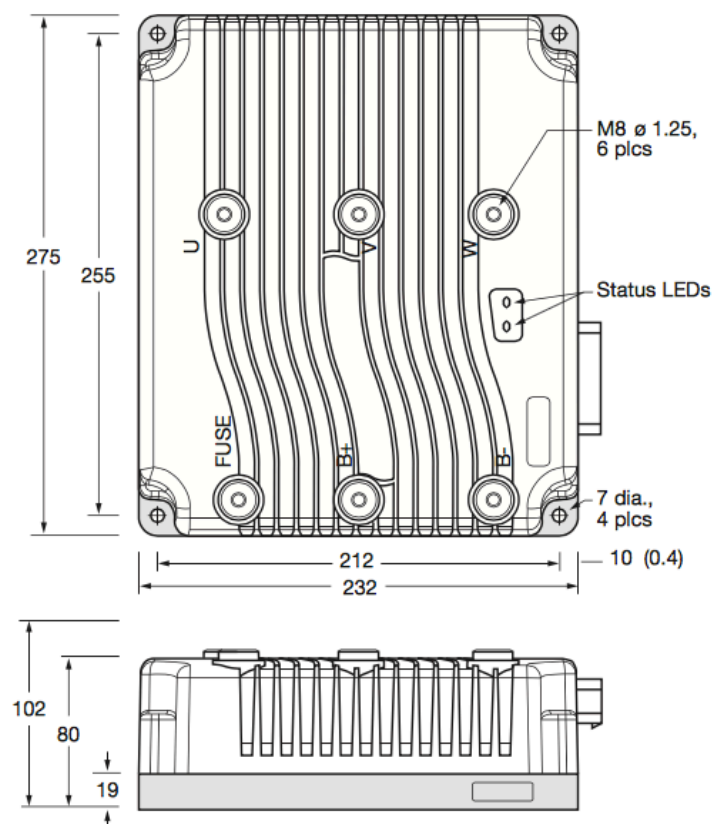




**Ilustración 11-** Curvas de comportamiento del motor AC-12 alimentado a 96V y 650A

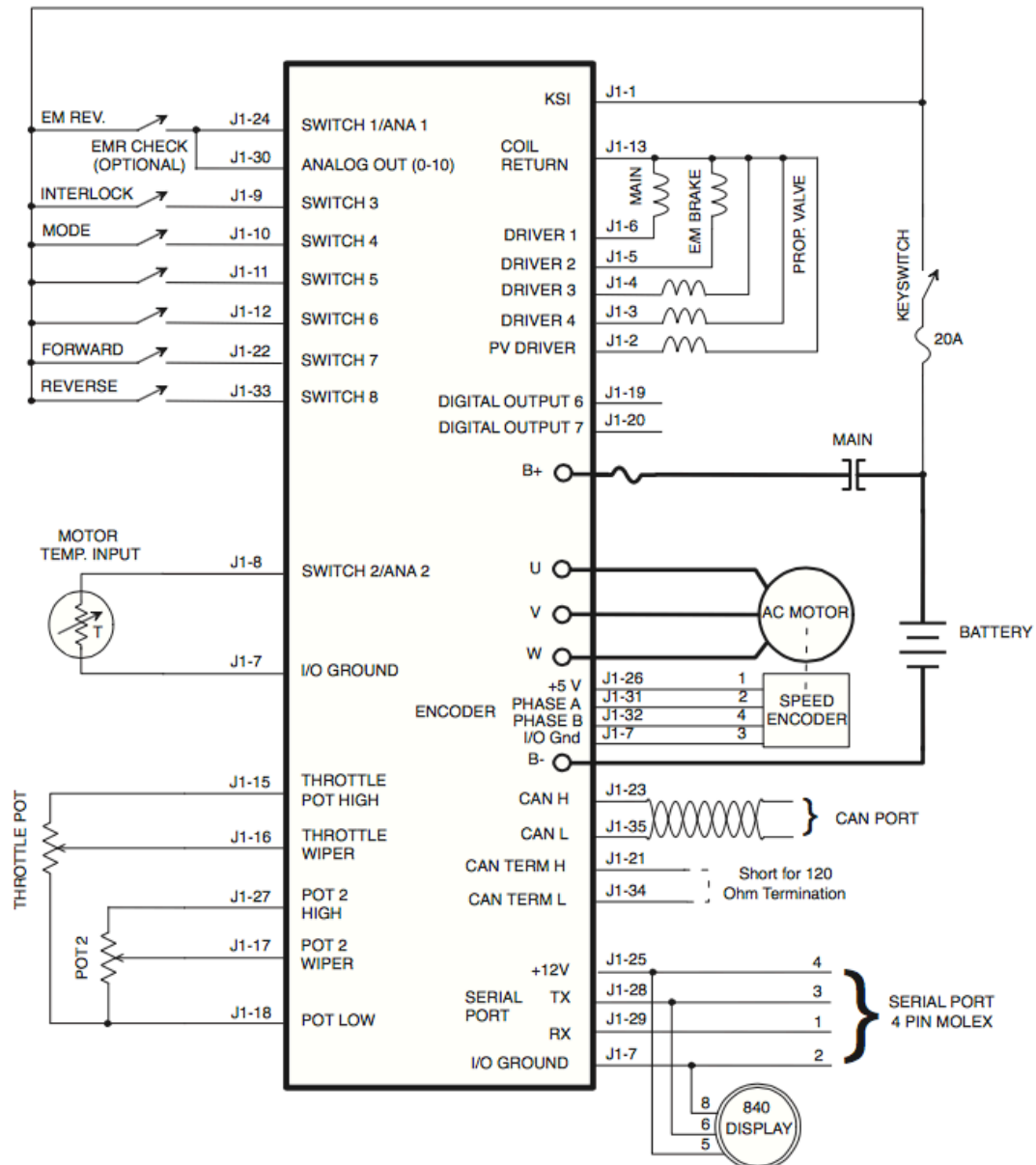
**DIMENSIONS mm (typical)**

1238E



**Ilustración 12-** Dimensiones controlador Curtis 1238

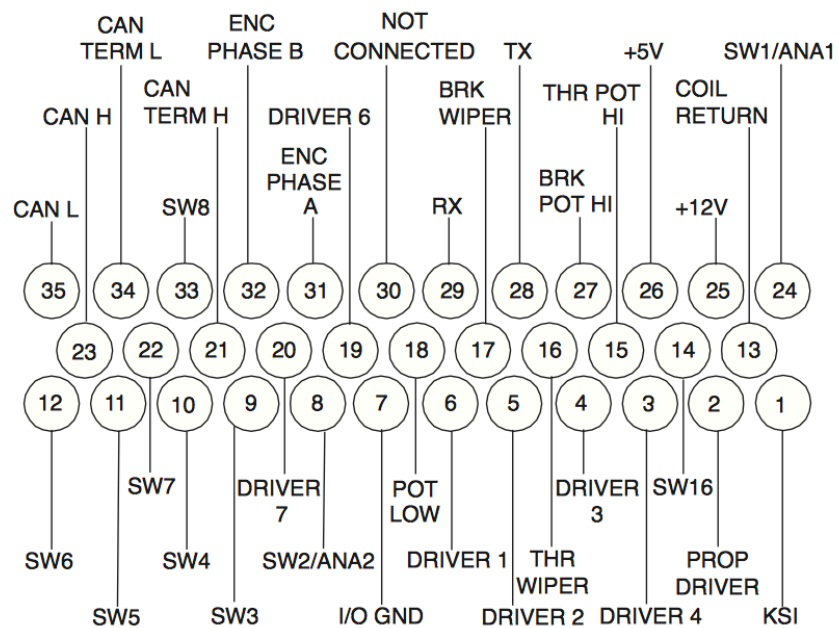
## TYPICAL WIRING



www.curtisinstruments.com

*Ilustración 13- Esquema de cableado controlador Curtis 1238*

## CONNECTOR WIRING



[www.curtisinstruments.com](http://www.curtisinstruments.com)

**Ilustración 14-** Esquema de conexiones controlador Curtis 1238

## Bibliografía

En el primer apartado de referencias bibliográficas figuran aquellas referencias que han sido citadas a lo largo del trabajo. Éstas se encuentran numeradas en orden y se han indicado en el lugar donde aparecen en el texto. En el segundo apartado, de bibliografía complementaria, se incluye documentación que no se ha citado explícitamente en el trabajo pero que puede ser de interés para el lector.

### Referencias bibliográficas

- [1] Ministerio de la Presidencia, Gobierno de España, *Real Decreto 750/2010, de 4 de junio, por el que se regulan los procedimientos de homologación de vehículos de motor y sus remolques, máquinas autopropulsadas o remolcadas, vehículos agrícolas, así como de sistemas, partes y piezas de dichos vehículos*. Publicado en BOE núm. 153, de 24 de junio de 2010. [<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2010-9994>].
- [2] Ayuntamiento de Barcelona, *Plan de Movilidad Urbana*, 2013. [<http://mobilitat.ajuntament.barcelona.cat/es/plan-de-movilidad-urbana/presentacion>].
- [3] Ayuntamiento de Barcelona, Departamento de Estadística, *Encuesta de Movilidad en Día Laboral*, 2015. [[http://www.amb.cat/documents/11704/747155/EMEF+2015\\_Informe+AMB.pdf/33ab41f5-5e03-4de9-b9e6-254239a44136](http://www.amb.cat/documents/11704/747155/EMEF+2015_Informe+AMB.pdf/33ab41f5-5e03-4de9-b9e6-254239a44136)].
- [4] Ayuntamiento de Madrid, *Plan de Movilidad Urbana Sostenible*, 2014. [[http://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/UDCMovilidadTransportes/MOVILIDAD/PMUS\\_Madrid\\_2/PMUS%20Madrid/Plan%20de%20Movilidad%20de%20Madrid%20aprobacion%20final.pdf](http://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/UDCMovilidadTransportes/MOVILIDAD/PMUS_Madrid_2/PMUS%20Madrid/Plan%20de%20Movilidad%20de%20Madrid%20aprobacion%20final.pdf)].
- [5] European Environment Agency (EEA), *Occupancy rates of passenger vehicles*, 2016. [<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/occupancy-rates-of-passenger-vehicles/occupancy-rates-of-passenger-vehicles>].
- [6] Gustavo Nuñez, *El 41% de los españoles que va en coche al trabajo tarda más de una hora, según Nielsen*, 15 de abril de 2014. [<http://www.nielsen.com/es/es/insights/news/2014/el-41-de-los-espanoles-que-va-en-coche-al-trabajo-tarda-mas-de-una-hora-segun-nielsen.html>].
- [7] Generalitat de Catalunya, Agencia Tributària de Catalunya, *Ley 5/2017, del 28 de marzo, de medidas fiscales, administrativas, financieras y del sector público (DOGC núm. 7340)*, 30 de marzo de 2017. [<https://atc.gencat.cat/es/tributs/impost-emissions-vehicles/>].

- [8] Generalitat de Catalunya, Departament de Territori i Sostenibilitat, *Acord polític per a la millora de la qualitat de l'aire a la conurbació de Barcelona*, 2017.  
[<http://mediambient.gencat.cat/web/.content/home/actualitat/2017/doc/Acord-politic-qualitat-de-aire.pdf>].
- [9] Ministerio de la Presidencia, Gobierno de España, *Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Circulación para la aplicación y desarrollo del texto articulado de la Ley sobre tráfico, circulación de vehículos a motor y seguridad vial, aprobado por el Real Decreto Legislativo 339/1990, de 2 de marzo*. Publicado en BOE núm. 306, 23 de diciembre de 2003.  
[<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2003-23514>].
- [10] Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (EMPA). *"Batteries for battery powered cars are more environmentally friendly than expected."* Publicado por ScienceDaily, 30 de agosto 2010.  
[<https://www.sciencedaily.com/releases/2010/08/100830120945.htm>].
- [11] Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE/ONU), *Reglamento número 100 que recoge las disposiciones uniformes relativas a la homologación de vehículos en relación con los requisitos específicos del grupo motopropulsor eléctrico*. Documento publicado en el Diario Oficial de la Unión Europea, el 31 de marzo de 2015.

### Bibliografía complementaria

- [1] Piaggio Commercial Vehicles, *Catálogo Piaggio Porter Electric*.  
[[http://www.piaggiocommercialvehicles.com/mediaObject/commercial-vehicles/es/others/ESP-Electric-Porter-09-2015-\(ae\)/original/ESP-Electric+Porter+09-2015+%28ae%29.pdf](http://www.piaggiocommercialvehicles.com/mediaObject/commercial-vehicles/es/others/ESP-Electric-Porter-09-2015-(ae)/original/ESP-Electric+Porter+09-2015+%28ae%29.pdf)]
- [2] Mahindra Reva Electric Vehicles, *Catálogo Mahindra e2o*.  
[[https://www.mahindrae2oplus.com/pages/pdf/e2oPlus\\_Brochure.pdf](https://www.mahindrae2oplus.com/pages/pdf/e2oPlus_Brochure.pdf)].
- [3] Mitsubishi Motors, *Catálogo Mitsubishi i-MiE*. [<https://www.mitsubishi-motors.es/imiev/#!descargas>].
- [4] Citroën España, *Catálogo Citroën C-Zero*.  
[[http://data.citroen.fr/Resources/Content/ES/07\\_catalogos/vehiculos/fichas\\_tecnicas/2016/CT\\_C-ZERO\\_09\\_16.pdf](http://data.citroen.fr/Resources/Content/ES/07_catalogos/vehiculos/fichas_tecnicas/2016/CT_C-ZERO_09_16.pdf)].
- [5] Peugeot España, *Ficha de información técnica Peugeot iOn*.  
[<http://www.peugeot.es/gama/selector-de-coches/peugeot-ion/informacion-tecnica.html>].

- [6] Hi Performance Electric Vehicle Systems, *Información técnica del motor AC-12*. [<http://www.hpevs.com/hpevs-ac-electric-motors-ac12-for-golf-car-mining-utility-ground-support-vehicles.htm>].
- [7] Curtis Instruments, Inc. *Información técnica del controlador Curtis 1238-7601*. [<http://curtisinstruments.com/?fuseaction=Products.home#/motorcontrollers/64>].
- [8] Electric Motor Sport, Inc. *Información técnica del Pack de baterías de 12V 100Ah*. [<http://www.electricmotorsport.com/ev-parts/batteries/lithium/4-cell-12v-packs/gbs-12v-4-cell-100ah-lifemnp04.html>].
- [9] AA Portable Power Corp, *Información técnica del BMS-EL-V7*. [<http://www.batteryspace.com/Slave-Module-Expansion-Board-for-LFP-BMS-Starter-Kit-4-cell-string-V7.aspx>].
- [10] AA Portable Power Corp, *Información técnica del BMS-EP128*. [<http://www.batteryspace.com/lfp-bms-starter-kit-for-12-8v-lifepo4-prismatic-battery-pack-4-cells-with-lcd-screen-display.aspx>].
- [11] AA Portable Power Corp, *Energy Management System Operation Manual*. [<http://www.batteryspace.com/prod-specs/6411-MANUAL%20.pdf>].
- [12] AA Portable Power Corp, *Energy Management System Step-by-Step SETUP Guide*. [<http://www.batteryspace.com/prod-specs/6411-Step-by-stepSetupGuide.pdf>].
- [13] Electronic Conversions, *Información técnica del PFC1500*. [<http://www.elconchargers.com/catalog/item/7344653/7638003.htm>].